De natuurkunde van 't vrije veld. Deel II

Geluid, warmte, elektriciteit

Marcel Minnaert

bron
Marcel Minnaert, *De natuurkunde van 't vrije veld. Deel II. Geluid, warmte, elektriciteit*. W.J. Thieme, Zutphen 1939

Zie voor verantwoording: http://www.dbnl.org/tekst/minn004natu02_01/colofon.htm



Voorwoord

Het stemt mij tot warme vreugde, dat het eerste deel van 'de Natuurkunde van 't vrije Veld' zo gunstig ontvangen is en reeds in het Engels werd vertaald, terwijl het tweede deel daardoor spoedig op het eerste kon volgen. Deze nieuwe bundel vormt een zelfstandig geheel zoals de eerste, maar sluit erbij aan daar het werk als een eenheid is geschreven. Herhaald moge worden, dat het mijn bedoeling was, een overzicht te geven van de natuurverschijnselen, die men zonder instrumenten en zonder statistisch werk in de open lucht waarneemt. Door deze opzet is de behandeling van de onderwerpen uit het meteorologische grensgebied veel meer natuurkundig geworden dan meteorologisch. Veelvuldig is gebruik gemaakt van de oudere litteratuur, omdat men vroeger minder instrumenten gebruikte, en dus in omstandigheden werkte welke meer met die onzer lezers te vergelijken zijn; de verklaringen en de theorie zijn echter aan de moderne opvattingen aangepast.

Aan allen die mij hebben geholpen met inlichtingen of die mij toestonden plaatjes te reproduceren, betuig ik hierbij mijn hartelijke dank. Mijn grote waardering voor de uitgevers, die dit omvangrijke werk in onze eigen taal hebben durven uitgeven en voor een sierlijk uiterlijk hebben gezorgd!

Moge ook dit deel ertoe medewerken, de overgrote rijkdom aan natuurverschijnselen te doen kennen waar wij bestendig van kunnen genieten, en waarvan elk ons een nieuwe gevoelsstemming brengt en een nieuwe schoonheid.

De Natuurkunde van 't Vrije Veld
II.
Geluid - warmte electriciteit

Voor veel van de in dit boek behandelde verschijnselen zal men met vrucht raadplegen: W.J. Humphreys, Physics of the Air (Washington, 1928).

De voortplanting van het geluid.

Zijt ge wel eens met stille stap en zwijgend
Gestegen op de berg die reikt ten hemel?
En hebt ge - over zee en aard u neigend -,
In stilte zwijgend hebt ge dan geluisterd?

V. Hugo, Ce qu'on entend sur la Montagne.

1. Absolute toonhoogte.

Bij onderzoekingen over natuurgeluiden is het dikwijls nodig de absolute toonhoogte te bepalen. Sommige mensen hebben daar een goed geheugen voor, het ‘absolute muzikale geheugen’; de meesten kunnen het niet, ook al zijn ze muzikaal ontwikkeld. Ziehier enkele hulpmiddeltjes. -

a. Rol een blad papier tot een koker en tik er zachtjes tegen.[1)] Als de koker 33 cm lang is, hoort men de toon c^2 van 510 trillingen per sekunde. In het algemeen is het aantal trillingen $N = 340/2l$, waarin l = lengte van de buis in meters. Houd het oor niet te dicht bij de buis, anders daalt het geluid!

b. Fluit zachtjes; welke toon is de laagste en welke de hoogste die u kunt voortbrengen? Vergelijk met de piano en onthoud. Deze grenzen zijn betrekkelijk zeer constant (bij mij *b* tot d^3).

c. De spaken van een fietswiel geven een duidelijke, muzikale toon als men ze ‘tokkelt.’ Kies een spaak uit, bijvoorbeeld die welke bij het ventiel eindigt.

d. De nauwkeurigste methode: neem een stemfluitje mee, zoals iedere winkel van muziekinstrumenten er verkoopt!

2. Tonen en boventonen.

Telkens als de lucht vele malen per sekunde op dezelfde wijze gestoord wordt, ontstaat geluid. Hoe meer impulsen per sekunde, hoe hoger toon. Voorbeelden:

1) Von Oppel, Ann. d. Phys. **122**, 335, 1864. Dezelfde methode was al gebruikt door Huygens (§ 30).

zagen in een mechanische houtzagerij (elke tand die het hout treft geeft een luchtstoring);
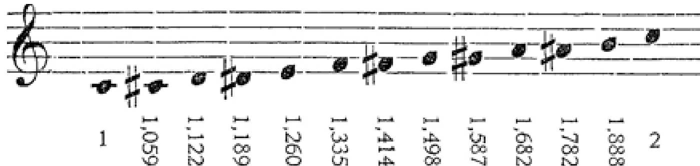
snorrende machines ener fabriek, overal waar tandwielen ineengrijpen;

electrische motoren van de spoorweg Rotterdam - Amsterdam; motoren van auto's en vliegmachines;

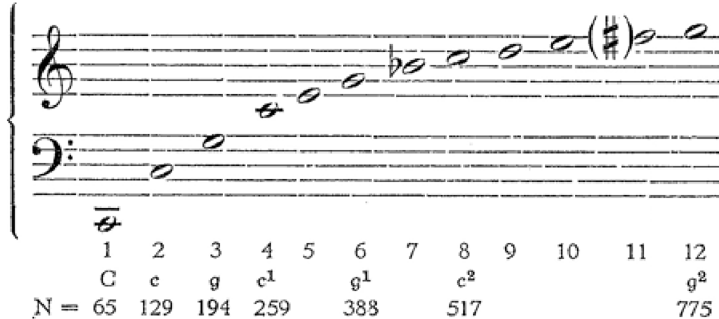
de sirene.

Als de toon verandert, kan men uit het interval onmiddellijk besluiten, hoeveel sneller of langzamer de machine draait.

Trillingsverhoudingen voor alle halve tonen der toonladder (gelijkmatige stemming):



De meeste tonen die U in de natuur hoort zijn niet enkelvoudig, ze zijn vergezeld van zwakkere *boventonen*; soms zijn die zo zwak, dat U hun aanwezigheid niet eens merkt, soms zijn ze echter zeer mooi en duidelijk hoorbaar, bijvoorbeeld bij het snerpend geluid der cirkelzaag; nu eens overweegt de ene, dan de andere boventoon. De meest voorkomende zijn die waarvan de trillingsgetallen zich verhouden zoals 1, 2, 3, ..., de zgn. *harmonische boventonen*, waarvan de eerste hieronder zijn opgeschreven voor de toon van *C*, en die het nuttig is zich in te prenten; de verhouding hunner volgnummers is tevens die hunner trillingsgetallen. Klokken zijn een goed voorbeeld van tonen met sterk afwijkende boventonen, die niet tot de harmonische reeks behoren.



3. De snelheid van het geluid.

Een man hakt in de verte hout; een heitoestel is aan het werk. Uit de verte ziet men bijl of heiblok *geluidloos* neervallen, en pas *daarna* hoort men de slag.

Op een groot voetbalveld hoort men de schop tegen de bal op het ogenblik dat het ding al hoog in de lucht vliegt.

Kijk naar een lange stoet die een muziekkorps aan het hoofd

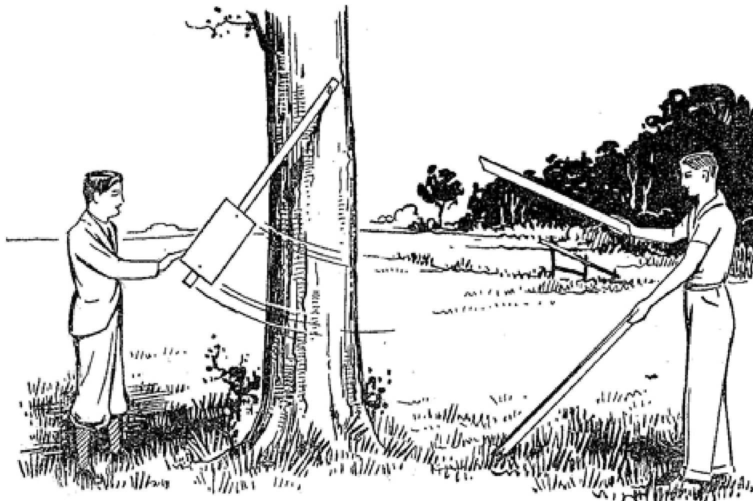


Fig. 1. We bepalen de snelheid van het geluid.

heeft. De voorste rijen marcheren op stap, de volgende komen iets achter, de laatste stappen in een geheel andere phase. Men ziet een echte bewegingsgolf langs de stoet lopen: ze begeleidt de geluidsgolf zelf die van het muziekkorps is uitgegaan, en die de achterste rangen later bereikt dan de voorste.

We gaan de voortplantingssnelheid van het geluid bij benadering bepalen (fig. 1). Zoek een open terrein van wel 400 m lengte: weiland, heide, rechte weg; en, aan het uiteinde van waar de wind waait, een paal of een flinke boom, vrij van lage takken, door de zon beschenen en goed van verre zichtbaar. We hebben een houten lat meegenomen van precies 1,50 m lengte; doorboor die met een fretboortje vlak bij haar uiteinde, en draai het fret-

boortje verder zo hoog mogelijk in de boomstam. Het boortje moet tenminste een 12 cm lang zijn, dan bengelt de lange lat lustig heen en weer als een slinger; om de slingeringen van verre duidelijk zichtbaar te maken, wordt er een stuk wit karton met punaises aan bevestigd. Nu moet iemand naast de slinger staan en hem telkens met een duwtje aan 't slingeren houden, maar zo dat hij nooit meer dan 45° uitwijkt; meet met behulp van het horloge hoe lang een bepaald aantal slingeringen duurt: voor één heen - of één teruggang is het vrijwel nauwkeurig 1 sekunde. Een ander waarnemer staat ernaast, gewapend met twee sterke latten van ongeveer 1 m lengte, en kletst die tegen elkaar, juist op het ogenblik, dat de slinger zijn uiterste stand naar *rechts* heeft bereikt. Deze knal en de door de zon beschenen slinger zijn verbazend ver waar te nemen.

Nu gaan we ons verder en verder van de slinger verwijderen. Op 100 m komt de knal al merkbaar te laat. Op 200 m nog meer. We gaan zover achteruit tot de knal schijnt samen te vallen met de *linker* stand van de lat, - terwijl ginds toch altijd op de rechterstand geklopt wordt; dit punt bepalen we zo nauwkeurig mogelijk, door eerst te ver, dan weer te dicht te gaan staan. Als we met velen zijn, gaat ieder op zijn eigen houtje oordelen, en wij nemen tenslotte 't gemiddelde van de zwerm. Blijkbaar hebben we hier de afstand die het geluid in 1 sekunde kan afleggen. Deze afstand tot de slinger wordt gemeten, met behulp van een touw van 10 meter lengte of met de fiets. Er komt een getal uit tussen de 300 en de 400 m. De juiste waarde is: 340 m (bij gemiddelde temperatuur).

Een trein in de verte fluit. Eerst verschijnt de stoom, pas daarna hoort men het geluid. Schat de tijdsruimte. Hoever is de trein van ons verwijderd?

Schat de tijdsruimte *t* tussen de bliksem en het eerste daarop volgende dondergeluid. De afstand van de bui is: 340 m × *t* (Vgl. § 200).

4. De uitbreiding van een knalgolf zichtbaar op de wolkenlaag[1)].

Door vele, betrouwbare waarnemers wordt medegedeeld, dat gedurende de wereldoorlog, bij bepaalde weertoestanden, de uitbreiding van de knal van elk kanonschot over de wolken-

1) Schmauss, Met. Zs. **35**, 184, 1918. - L'Astronomie, 1917, 1918, 1919, 1938. - Vgl. ook I, § 126.

laag duidelijk zichtbaar was: men bemerkte een fijne, donkere ring op de wolken, die zich snel verwijdde.

Het schijnt dus wel, dat de knalgolf een geringe condensatie van de waterdamp kan teweegbrengen, of althans een ineenvloeien van de wolkendruppeltjes. Uit de hoek ϑ waarondér de golf per sekunde schijnt voort te lopen, zou gemakkelijk de hoogte der wolkenlaag te bepalen zijn: $h = 340$ m / tg ϑ (voor een knal die dicht bij ons ontstaat).

5. Geluidvoortplanting bij ontploffingen.[1]

Bij ontploffingen van grote hoeveelheden explosiestoffen, breken dikwijls een aantal ruiten van naburige huizen. Als we de huizen onderzoeken die het dichtstbij staan, vinden we merkwaardigerwijze dat de scherven van bijna elke ruit *naar de ontploffingshaard toe* geslingerd zijn. Bij de verder afgelegen huizen zijn er scherven zowel naar de haard toe als van de haard af geslingerd. En bij de verste liggen alle scherven van de haard af.

Riemann nu heeft bewezen, dat bij een golf van zeer grote sterkte ('bij eindige amplitude') de trillingswijze der luchtdeeltjes

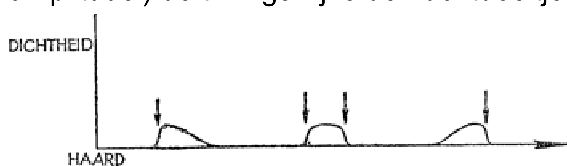


Fig. 2. De verdeling der dichtheid in een knalgolf op verschillende afstanden van de geluidsbron.
Vertikale pijltjes geven aan wààr de dichtheid het snelst verandert.

met de afstand verandert. In fig. 2 is voorgesteld hoe de dichtheidsverdeling in een knalgolf zich gedurende de voortplanting wijzigt. Als men zich deze golven voorstelt voorbij een bepaald punt lopend, ziet men dat de plotselinge sterke dichtheidsverandering eerst naar de trillingsbron toe gericht is, dan van haar af, zoals de waarnemingen het vereisen.

Bij de ontploffing te Erith in 1864 werd in 't bijzonder opgemerkt[2] hoe *alle* ruiten van de kerk ingedrukt waren, en hoe de

1) Ann. d. Phys. **69**, 329, 1899.
2) J. Tyndall, Sound, blz. 23.

ruiten der huizen ook stuk waren, als ze van de ontploffingshaard waren afgekeerd: wel een bewijs dat de geluidsgolf om de kerk en de huizen gebogen was (vgl § 23).

6. Voortplanting van het geluid door water.

Onder water hoort men zeer goed. Laat in een zweminrichting iemand onder water met een hamer op een stuk metaal slaan; stel U op grote afstand en houd het hoofd onder water. Het geluid is duidelijk hoorbaar.

Er wordt beweerd dat een duiker onder water een horloge op 't gehoor kan vinden. Ik heb dit beproefd, na een reep leukoplast om de rand van 't horloge geplakt te hebben om beschadiging te voorkomen; de proef lukt mij niet, maar wellicht is een ander gelukkiger!

7. Voortplanting van het geluid door de grond.

.... Toen wierp de schrandere Indiaan zich neer, drukte het oor tegen de grond en luisterde oplettend. ‘Ik hoor een troep dravende paarden, er zijn er ongeveer twintig en ze zullen over enkele minuten hier zijn. Het is hoog tijd om te vluchten!’ ....

- Is zo iets inderdaad mogelijk? Wat hoort U als U het oor tegen de grond legt? Ik heb de proef genomen aan het strand; op droog zand hoorde men stappen tot een afstand van ongeveer 25 m, elke stap klonk helder, alsof men op een holle ton sloeg; op nat zand hoorde men ze slechts tot 12 m, het geluid was dof alsof er op een volle ton geslagen werd. Vermoedelijk zou men op rotsbodem veel grotere afstanden halen.

Merkwaardigerwijze zijn er in de oorlogstijd een paar berichten verschenen van goede, betrouwbare waarnemers, die beweren dat ze verre donder en ver geschut veel beter konden horen als ze gingen liggen met het oor tegen de grond gedrukt.[1)] Op moeras - en veenbodem voelt men soms het dreunen van ver geschut met het gehele lichaam, terwijl het oor dit niet meer waarnemen kan; blijkbaar is er hier een aanzienlijk gedeelte der energie vertegenwoordigd door zeer langzame trillingen, die zich voortplanten op de wijze van aardbevingsgolven.

Luister ook met het oor op de grond naar de diepe geluidstrillingen, die een waterval aan de aarde meedeelt.

1) Hemel en Dampkring, **12**, 186, 1915; **13**, 12, 1915.

8. Voortplanting van het geluid langs de spoorrails.

Laat iemand matig hard met een hamer op een spoorrail slaan. Op 50 m afstand staande hoort men een duidelijke, korte tik, en onmiddellijk daarna een lange daverende slag. Blijkbaar heeft het geluid zich zeer snel door het ijzer van de rail voortgeplant (5000 m/sec), en tevens is het op langzamer wijze door de lucht naar ons oor gekomen (340 m/sec). Op 100 m en zelfs op 150 m zijn tik en slag nog duidelijk te horen, als men maar het oor goed tegen de rail drukt. Nog op die afstand ziet men de hamer precies neervallen op *hetzelfde* ogenblik waarop de eerste tik aankomt; het geluid gaat dus wel *zeer snel* door het ijzer!

Bij springende mijnen is een dergelijk verschijnsel bekend.[1] Op een afstand van 300 m bijvoorbeeld hoort de waarnemer eerst een knetterend geluid, ongeveer een sekunde later een zware slag. Het eerste is de aardbevingsgolf, die door de vaste aarde loopt met een snelheid van 6 km/sec; het tweede is de geluidgolf, die via de lucht aankomt. Op 5 tot 10 km afstand is de eerste golf niet meer waarneembaar.

9. Draadtelefoon.

Twee houten plankjes van 3 mm dikte zijn verbonden door een telegraafdraad van 150 of 200 m

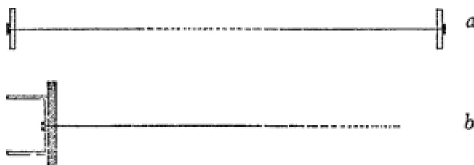


Fig. 3. Eenvoudige vormen van draadtelefoon.

lengte. De draad gaat door een gaatje in het plankje en is om een spijker gewonden (fig. 3*a*). Door trekken aan de plankjes spant men de draad matig; de ene waarnemer spreekt tegen het ene plankje, en de andere luistert met zijn oor tegen het andere.[2]

Men kan ook een sigarenkistje nemen om de klank te versterken; voor de stevigheid rust dit tegen een doorboorde plank van 2 cm dikte (fig. 3*b*). Weinhold[3] geeft aan dat hij tussen twee dezer ontvangers een ijzerdraad van 650 m gespannen had, bestaande uit 5 zorgvuldig aaneengedraaide stukken; de twee uit-

1) Hemel en Dampkring, **13**, 28, 1915.
2) Millar, Nat. **17**, 519, 1878.
3) Carl Repertorium, **6**, 168, 1870.

einden bevonden zich in twee alleenstaande huizen. Men kon goed met elkaar spreken, het geluid van een muziekdoos overbrengen, enz. De spanning bedroeg 8 kg. - Een tik tegen een uiteinde gaf een 4 - tot 6 - voudige echo, zodat men de snelheid van het geluid door ijzer rechtstreeks kon schatten.

Nog anderen gebruiken een stuk perkamentpapier, over een hoepeltje van 15 cm diameter gespannen; in het midden wordt een lang touw van 0,5 mm dikte bevestigd, dat naar het tweede, evenzo opgestelde vlies loopt. Het touw moet matig gespannen worden, en kan desnoods op enkele punten door middel van lussen ondersteund of om hoeken geleid worden.

In elk dezer toestelletjes is het beginsel hetzelfde: het sterk gedempte plankje of vlies trilt met de geluiden mee, en veroorzaakt longitudinale trillingen in de draad. Het ontvangststation zet deze trillingen weer om in dwarse trillingen van de plaat, en die brengen op hun beurt de lucht in trilling.

10. Voortplanting van een dwarse golf langs een gespannen draad.[1)]

Tussen twee bomen die ongeveer 50 m van elkaar verwijderd zijn, wordt een lange staaldraad gespannen, die ongeveer 1 mm dik is (fig. 4). Bij het ene uiteinde is een veerbalans ingeschakeld

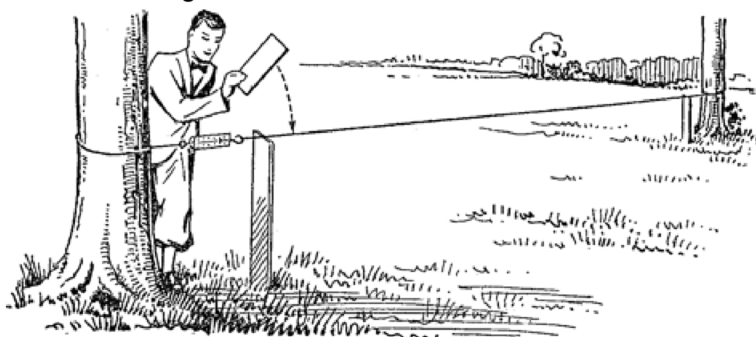


Fig. 4. Voortplanting van een dwarse golf langs een gespannen staaldraad.

om de spanning te meten (10 tot 20 kg). Verder kan men nog aan elk uiteinde een plankje opstellen dat als 'kam' dienst doet, en de lengte van de draad begrenst.

1) Hahn-Koch, Physikalische Schülerübungen, blz. 79 (Teubner, 1927).

Sla nu kort en krachtig op het ene uiteinde, met behulp van een hamer of van een plankje. U ziet de golf een aantal malen langs de draad heen en terug lopen, verrassend lang! Let op de schittering van de draad waar hij de zon terugkaatst. Als de beweging zwakker wordt kunt U nog de vingers op de draad houden en voelen hoe de golf scherp rukkend voorbijschiet. Tel het aantal heen - en weergangen gedurende ½ minuut, en bereken hieruit het aantal heen - en weergangen N gedurende 1 sekunde. Meet verder de lengte *l* van de draad, en onderzoek of de aldus bepaalde snelheid *v* = 2 N*l* van de golf met de theorie uitkomt:

$$v = \sqrt{\frac{S}{\varrho}},$$

waarin S de spanning is per cm^2 doorsnede (in dynes), ϱ de soortelijke massa van ijzer. Bij een bepaalde proef vond ik:

v = 2 N*l* = 2 × 1,9 × 4000 = 15200 cm/sec; terwijl.

$$\sqrt{\frac{S}{\varrho}} = \sqrt{\frac{16,5 \times 10^3 \times 981}{0,83 \;\; 10^{-2}} \cdot \frac{1}{7,8}} = 15800 \text{ cm/sec}$$

. De overeenstemming is voldoende; de voornaamste oorzaak van de afwijking is meestal de onbetrouwbaarheid van de veerbalansen, die men eigenlijk met gewichten moet controleren.

Merk op dat we hier de voortplantingssnelheid bepaald hebben van een *dwarse* golf, die bepaald wordt door de spanning en de massa van de staaldraad. We vinden dus een geheel andere (veel kleinere) waarde dan voor de snelheid der *longitudinale* golf, die we in § 8 en 9 onderzochten, en die bepaald wordt door de veerkracht en de massa.

Ga meer naar het midden van de draad staan, en neem waar dat een *naar beneden* gerichte bocht bij haar terugkeer *naar boven* gericht is; na twee terugkaatsingen weer *naar beneden*. Als we telkens opnieuw op de draad sloegen wanneer de golf tot bij ons is teruggekeerd en tweemaal teruggekaatst is; en als we inplaats van een korte slag een iets langzamer duw gaven, zou de draad in resonantie komen en een staande trilling vertonen. Beproef dit! Het trillingstal is nu

$$\frac{v}{2l} = N = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{S}{\varrho}}$$

; dit is de formule van de snaar.

Vgl. § 11 en 52.

11. De rhythmus der scheepstrekkers.

De scheepstrekkers schrijden in langzaam-zware rhythmische stap; telkens als ze trekken spant zich het touw, om daarna even door te hangen. Die maat waarin ze trekken is niet willekeurig, ze is gegeven door het touw zelf, dat eigenlijk als een reusachtige snaar aan het trillen is.

Komt het uit met de berekende periode? De formule ontlenen we aan § 10:

$$N = \frac{v}{2l} = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{S}{\varrho}} = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{P}{m}},$$

waarin *P* = spannende kracht, *m* = massa van het touw per lengte-eenheid. Schattenderwijze wordt (als lengte-eenheid de meter gebruikend):

$$N = \frac{1}{70}\sqrt{\frac{9{,}81 \times 100000}{200}} \backsim 1.$$

Er wordt wel iets langzamer dan eens in de sekunde getrokken, maar het is toch duidelijk dat we de goede orde van grootte getroffen hebben.

12. Geluidschaduwen.

Muren en huizen laten praktisch geen geluid door. Werpen zij nu ook een 'geluidschaduw' achter zich?

Ga van een hoofdstraat naar een stille zijstraat en merk op hoe snel het lawaai van het verkeer afneemt; blijkbaar bevinden wij ons nu in de geluidschaduw. Daar we echter toch nog vele geluiden vernemen van onzichtbare bronnen, besluiten we dat de klankgolven ook in zekere mate om de hoeken kunnen buigen, zoals watergolven (§ 5). Bij deze en de nog volgende waarnemingen blijkt ons telkens, dat de diepe geluiden die een grote golflengte hebben nog over vrij grote afstanden om de hindernissen buigen; terwijl de hoge, ruisende en sissende geluiden met hun zeer korte golflengten veel scherper afgesneden worden.

Een lokomotief staat te sissen, tussen haar en mij rijdt een trein langzaam voorbij. Telkenmale dat ik tussen twee treinwagens door de lokomotief zie, is het geluid aanzienlijk versterkt.

Een beekje wordt voor mij verborgen door een plooi van het besneeuwde terrein, zodra ik mij een weinig buk. Richt ik mij op, dan zie ik het weer. Nu is het verrassend hoe plotseling het geluid afneemt op het ogenblik dat mijn oog het beekje niet meer

waarneemt; bij een verplaatsing over een hoek van 1°, gemeten van op het terreinheuveltje, is het geluid al sterk verzwakt.

Van een muziekkorps, dat in een naburige straat speelt, hoort men vooral de grote trom; haar zeer lage tonen hebben een grote golflengte en buigen goed om de hoeken.

13. Hoorbaarheid van geluiden.

Iedereen weet dat het geluid beter te horen is met de wind dan tegen de wind. Dit is echter volstrekt niet vanzelfsprekend! Als men er nader over denkt, zou men alleen verwachten, dat in het ene geval de snelheid gelijk is aan die van geluid en wind samen, in het andere geval aan hun verschil. Maar van dat kleine onderscheid in snelheid kunnen

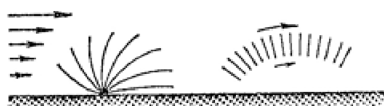


Fig. 5. Ombuigen der geluidsgolven bij naar boven toenemende wind. Links: de ‘geluidstralen.’ Rechts: de golffronten.

we niets merken; wat we waarnemen is een sterk verschil in de *geluidssterkte*.

De verklaring werd gegeven door Stokes.[1] *De* ‘*ge*; *luidstralen*’ *worden gekromd, doordat de wind boven altijd sneller is dan beneden* en hij dus de golffronten in hun hoogste gedeelten sterker meevoert (fig. 5). Onder de wind wordt het geluid dus weer naar den waarnemer teruggevoerd, boven de wind bereikt hem het grootste gedeelte van het geluid niet meer. Het effekt kan zo sterk zijn, dat kanonschoten die met de wind op 15 tot 25 km gehoord werden, tegen de wind reeds bij 550 m geheel onhoorbaar werden![2]

Het is niet moeilijk, enige proeven te nemen over deze verschijnselen.[2] We kiezen liefst een dag met betrokken lucht, om complicaties van straks te vermelden aard te vermijden. Als geluidsbron gebruiken we een elektrische bel, die we op een tafeltje van 30 cm hoogte leggen te midden van een grote wei, en die we aanhoudend door laten ratelen. We verwijderen ons nu zover tot we 't geluid niet meer horen, - of liever, tot het af en toe verdwijnt, af en toe weer verschijnt. *Bij windstilte of lichte wind* is het al opvallend dat alle geluiden beter gehoord worden, als men rechtop staat, dan als men op de grond gaat liggen;

1) Rep. Brit. Assoc. 1857, blz. 22. - Vgl. de kromming der lichtstralen, I, § 29.
2) O. Reynolds, Proc. R. Soc. **22**, 531, 1874.
2) O. Reynolds, Proc. R. Soc. **22**, 531, 1874.

blijkbaař worden de geluidsgolven door de wrijving tegen de begroeide grond gedempt, de voortplanting op grotere afstanden is slechts mogelijk doordat er voortdurend nieuwe golven vanuit de hoogte neerdalen. Dat de geluiden in de hoogte sterker zijn dan beneden blijkt ook als men op een boom klimt: de bel, die men eerst niet meer hoorde, klinkt dan ineens weer zeer duidelijk.

Bij sterke wind neemt de hoorbaarheid insgelijks toe met de hoogte van den waarnemer, maar dit effekt is veel sterker uitgesproken

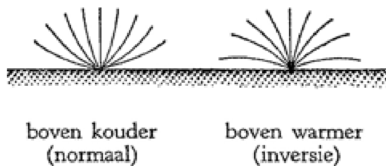


Fig. 6. Het ombuigen der geluidsgolven door temperatuurverval in de dampkring.

in de richting van waar de wind komt dan in de tegenovergestelde.

Over sneeuw is de demping veel geringer dan over gras, want men hoort het geluid wel 2½ maal verder. Ook over 't water is de demping klein en de hoorbaarheid uitstekend.

Een laatste proef kan men nemen door de bel op een hoogte van 1.30 m te leggen: zij is dan ineens veel beter hoorbaar op afstand, zoals men ook uit onze beschouwingen zou verwachten.

In heuvelland is het opvallend, hoe duidelijk het geluid door de wind meegevoerd wordt over de toppen. De windstroom, toenemend in snelheid met de afstand boven de grond, waait ongeveer evenwijdig aan het oppervlak, stijgt de ene helling op, daalt de andere weer af, en verzamelt daar weer de geluidsgolven.

Naast de wind is er nog een tweede faktor die de hoorbaarheid bepaalt: de temperatuur. Gewoonlijk wordt de grond bij dag door de zonnestralen verwarmd, en is de lucht beneden warmer, boven kouder. Nu plant het geluid zich sneller voort naarmate de lucht warmer is, dus zullen de geluidstralen zich van de grond af opwaarts krommen, en de hoorbaarheid is gering (fig. 6). Bij bepaalde weertoestanden echter neemt de temperatuur naar boven tóe in plaats van áf (‘inversies’): dit is bijvoorbeeld het het geval in heldere nachten. De hoorbaarheid is dan abnormaal sterk, en wel *naar alle richtingen* (in tegenstelling met de éénzijdige hoorbaarheid bij wind). Vandaar dat men zo dikwijls 's nachts allerlei geluiden opmerkt waarvan men anders niets bespeurt, bijvoorbeeld het klateren van water aan een sluisje;

de grotere stilte der omgeving kan zulke waarnemingen vergemakkelijken, maar is zeker niet de hoofdoorzaak.

> *Nacht is 't. Nu spreken helder alle fonteinen, en ook mijne ziel is een fontein.*
> *Fr. Nietzsche, Also sprach Zarathustra.*

Tyndall merkte op dat de geluiden van een misthoorn ineens zelfs op kleine afstand onhoorbaar werden als de zee in zonneschijn baadde, maar dat de hoorbaarheid bijna onmiddellijk toenam, zodra een wolk voorbijtrok; was hij in de mast van het schip geklommen, dan had hij wellicht bij zonneschijn de seinen veel duidelijker gehoord. Een aardige tegenhanger van deze waarneming werd mij meegedeeld door een mijner leerlingen aan de Volksuniversiteit te Amsterdam. Op zijn reizen door Zwitserland had hij waargenomen hoe bij zonnig weer de geluiden uit het dal buitengewoon goed te horen waren, wanneer hij zelf een 1000 m hoger stond; als echter een wolk haar schaduw over het dal wierp nam de hoorbaarheid af, evenzo was er bij donker weer niets te horen. Deze uitstekende waarneming komt voortreffelijk uit met onze beschouwingen.

Bij sterke temperatuurinversie kan de hoorbaarheid ongelofelijk groot worden. In de polder 'De Schermer,' heeft men opgemerkt dat op nachten met veel dauw (= onderste luchtlagen sterk afgekoeld) het geluid van de branding te horen is op 13 km afstand van de Noordzeekust.[1)]

Als de inversie ontstaat boven een rivier met hoge oevers, kan het geluid zich noch opzij, noch naar onder of boven uitbreiden, en draagt het soms tot op ongelofelijke afstanden, als door een reusachtige spreekbuis. Een van de merkwaardigste gevallen van die aard kwam voor bij de proeven van Osborn Reynolds, die zich met een schip in de monding van een grote Engelse rivier bevond.[2)] Het was zomernamiddag, windstil, de thermometer wees 19° C. Hij roeide met twee man verder en verder van het schip, af en toe roepend en luisterend of er antwoord kwam. Het bleek nu dat hij nog antwoord kreeg op 6 km afstand, 35 sekunden nadat hij geroepen had! En achteraf kon men zelfs uitmaken dat het roepen gehoord was tot een afstand van 9 km!! Daarbij werd geen enkel hulpmiddel gebruikt om het geluid te richten, te versterken of waar te nemen. Tevens merkte men

1) K. Braak, Tijdschr. Kon. Ned. Aardr. Gen. **39**, 587, 1922.
2) O. Reynolds, Papers, **1**, 160, 1876.

op, hoe duidelijk bepaalde geluiden van de oevers waarneembaar waren: hamerslagen, het blaffen van een hond, enz. Deze buitengewone hoorbaarheid ging gepaard met abnormale lichtbreking, die er op wees dat de temperatuur der lucht bij het water veel kouder moest zijn dan hoger: men zag de zee 'hol,' de verre voorwerpen schenen abnormaal hoog (Vgl. I, § 30). In andere dergelijke gevallen was de temperatuurtoeneming met de hoogte zo sterk, dat luchtspiegelingen optraden (I, § 32).

Bij zulke zeer sterke inversies heeft men soms opgemerkt dat een kanonschot een merkwaardige echo geeft:[1)] het is een geluid als het rollen van de donder, en het komt onmiskenbaar uit de richting van de hogere luchtlagen. Klaarblijkelijk heeft dus het geluid ons oor langs twee verschillende wegen bereikt, de ene dichtbij de grond, de andere veel hoger en sterk gekromd: dit is dus het acoustische analogon van de luchtspiegeling. In andere gevallen waren de knallen zelfs drievoudig tot 8-voudig; allerlei combinaties van meervoudige knallen en donderend rollen komen voor.

Telkens wanneer men reden heeft om een sterke inversie te vermoeden, vooral bij luchtspiegeling, moet men zijn aandacht vestigen op de hoorbaarheid van verre geluiden en knallen. Deze waarnemingen dienen gepaard te gaan met temperatuurbepalingen van het wateroppervlak en van de lucht op verschillende hoogten.

De wisselende omstandigheden van wind en temperatuur verklaren, waarom men treinen, klokken enz. de ene maal veel duidelijker hoort dan de andere. Een aantal plaatselijke legenden zijn daaraan verbonden. Zo schijnen er in de buurt van Lebbeke (Vlaanderen) 'waterklokken' te zijn, waarvan de hoorbaarheid geacht wordt het weer te voorspellen.[2)] In een ander geval werd opgemerkt, dat klokken die door een heuvel aan het gezicht onttrokken waren, slechts hoorbaar werden: *a*) bij sterke wind uit die richting, nog toenemend in sterkte met de hoogte; *b*) bij afkoeling van de onderste lagen door straling.[3)] Het lijkt niet onwaarschijnlijk dat het gebruik om de klokken hoog in de torens te hangen niet alleen ten doel heeft geluidschaduwen te

1) Rep. Brit. Assoc. 1875 (Dublin). - Nat. **13**, 67, 1875. - Met. Zs. **33**, 553, 1916. - R. Emden, Met. Zs. 1918. - V. Angerer & Ladenburg, Ann. d. Phys. **66**, 308, 1921.
2) M.W.R. **35**, 127, 1907.
3) Aus der Heimath, **41**, 295.

vermijden, maar ook de kromming van de geluidstralen onschadelijk te maken.

Mist vormt geen belemmering voor de hoorbaarheid,[1] integendeel, de dampkring is dan dikwijls zeer homogeen; meer nog: bij stralingsnevel zijn de onderste luchtlagen vlak boven de grond aanmerkelijk koeler dan de hogere en de hoorbaarheid is groot. Evenmin verzwakken regen, sneeuw of hagel het geluid. Daarentegen schijnen er hier en daar luchtmassa's voor te komen, die het geluid sterk verstrooien en daardoor tegenhouden; het zijn wervelingen van warme en koude, vochtige en droge lucht; deze onzichtbare ‘geluidswolken’ hebben vooral invloed op de waarneming van hoge tonen.

Tenslotte is de rust der omgeving een zeer belangrijke faktor, die de hoorbaarheid bevordert. Vandaar dat men verre geluiden meestal beter waarneemt in een dal dan boven op de heuvels, waar het geruis van de wind stoort; de wanden van het dal werken daarenboven enigszins als een holle spiegel, die het geluid verzamelt.

14. Hoorbaarheid van de donder.

Iedereen weet dat er een tijdsruimte verloopt tussen bliksem en donder, ongeveer 3 sekunden per kilometer afstand van de onweershaard (§ 40). Men kan nu beproeven bij een wegtrekkend onweer bliksem en donder zo lang mogelijk te blijven volgen; het mooist gaat dit 's nachts, als de bliksems goed zichtbaar zijn en alles om ons heen stil is. Afstanden van 30 tot 40 km zijn bereikt. Van Everdingen heeft 60 km gehaald, en Veenema toonde aan dat afstanden boven de 100 km voorkomen.[2] Bij zulke zeer lange tijden (tot 5 minuten!) wordt de waarneming slechts betrouwbaar, indien naderhand blijkt dat er in de waargenomen richting en op de geschatte afstand inderdaad onweer voorkwam omstreeks het ogenblik der waarneming; of beter nog, indien de waarneming volgt op een reeks andere, en de tussenruimten tussen licht en slag geleidelijk toenemen. De gunstigste omstandigheden zijn: rustige omgeving, vlak land, herfst, 's nachts buiten de stad, felle vertikale bliksems die men tot dicht bij de gezichteinder ziet. De gevallen waarin de donder op zulke grote afstanden gehoord wordt zijn zeer zeldzaam. Een afstand van

1) Tyndall. Phil. Trans. **164**, 183, 1874; Sound, hfdst. III.
2) Wetter, **34**, 1917 en **35**, 1918. Referaat in Hemel en Dampkring, **16**, 65, 1918.

10 km (30 sekunden) komt al bijna niet voor, zodat men wel mag zeggen *dat de donder slechts tot opvallend kleine afstanden hoorbaar is*. Dit wordt verklaarbaar als men bedenkt dat de wind van alle kanten naar het onweergebied toe waait, hetgeen de geluidstralen van de aarde af doet krommen.

Voor een gedeelte wordt de hoorbaarheidsgrens bepaald door *de demping*: de zeer diepe geluiden die in de donder een belangrijke rol spelen, hoort men veel eerder dan de hoge.

15. Abnormale hoorbaarheid op zeer grote afstanden.

Zeer merkwaardige waarnemingen zijn gedaan over de hoorbaarheid op grote afstanden bij ontploffingen, bij kanonbeschietingen,

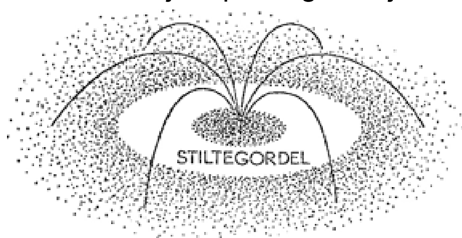


Fig. 7. Abnormale hoorbaarheid van het geluid op zeer grote afstanden.

of bij het inslaan van meteoren. In veel dezer gevallen weet de waarnemer niet vooruit dat hij iets te horen zal krijgen; het is dus zaak, duidelijke knallen waarvan men de oorsprong niet kent op te tekenen, en onmiddellijk tijd op te nemen.

Zulke knallen zijn om de geluidsbron tot een afstand van enige tientallen kilometers hoorbaar. Daar omheen bevindt zich een stiltegordel, waarin men niets waarneemt (fig. 7). *Nog verder komt er echter weer een gordel van abnormale hoorbaarheid*, die zich bijvoorbeeld van 100 tot 300 km kan uitstrekken! Die abnormale hoorbaarheid is toe te schrijven aan geluidsgolven die steil omhoog zijn gestegen, en in de stratosfeer op een hoogte van wellicht 40 km omgebogen zijn: dit is niet alleen een theoretische veronderstelling, maar het wordt bewezen door de abnormaal lange voortplantingstijden, die het geluid nodig heeft om die tweede hoorbaarheidsgordel te bereiken, tijden die meestal 1 of 2 minuten langer zijn dan voor een rechtlijnige voortplanting zou vereist zijn.

Voorlopig zouden er twee mogelijkheden zijn om dit ombuigen in de stratosfeer te verklaren: òf doordat daar *vrij hoge temperaturen* heersen; òf doordat de gassen daar *een geringer atoomgewicht* hebben (groot gehalte aan helium of waterstof); door beide

oorzaken zou de geluidssnelheid naar boven toenemen. Een keuze tussen die twee hypothesen is slechts mogelijk aan de hand van andere waarnemingen en berekeningen. Om verschillende redenen is men thans geneigd aan te nemen dat de samenstelling der gassen op die grote hoogten toch niet noemenswaard verschilt van hier beneden; terwijl alles er op wijst dat de temperaturen er zeer hoog zijn: misschien + 50° C, misschien + 100° C! 's Winters is de abnormale hoorbaarheid vooral in oostelijke richting waarneembaar, 's zomers in westelijke richting. In het eerste geval begint ze al bij 110 km, in het tweede bij 190 km; de hoorbaarheid is het grootst op 125 km, resp. 230 km.[1)] Dit asymmetrische onderscheid wijst op de mogelijke invloed van luchtstromen in de stratosfeer.

Ver kanongebulder is op bepaalde ‘goede plaatsen’ veel gemakkelijker te horen dan op andere. Het zijn meestal dalen, ravijnen, ruimten onder gewelven, waar er waarschijnlijk resonantie optreedt.[2)] Geregeld is de hoorbaarheid groter in het dal dan op de berg.

16. Niet-hoorbare ontploffingsgolven.

Bij ontploffingen en kanonschoten ontstaan ook geluidgolven van zo grote golflengte dat men ze niet horen kan.

Neem een ledig benzineblik van 5 tot 10 liter inhoud; aan de bovenzijde wordt dit met een grote kurk gestopt, waardoor een koperen buisje gaat van 4 cm lengte en 6 mm inwendige middellijn; aan de onderzijde wordt een buisje gesoldeerd, waarover een gummislang, door dewelke men lichtgas laat binnenstromen. Er mogen geen andere openingen in het benzineblik zijn. *Men wacht enige minuten, om zeker te zijn dat al de lucht verdreven is*; het uitstromende gas, in een reageerbuisje opgevangen en bij een vlam gebracht, moet wèl branden, maar geen knal geven. Nu ontsteekt men het gas, en regelt het *binnen*stromen, bijvoorbeeld door een houten knijper op de gummislang te zetten, tot de vlam slechts 1 à 2 cm hoog is. Zij heeft nu een buitengewone gevoeligheid voor de niet-hoorbare geluidsgolven van ontploffingen, kanonschoten enz. en wordt ineens korter als zulke golven aankomen; voor gewone geluiden echter is ze ongevoelig.

Met zulk een toestel nam Esclangon te Straatsburg de ontploffing waar in het kamp van La Courtine, 522 km daar vandaan.

1) Ann. d. Phys. **69**, 329, 1899.
2) Met. Zs. **34**, 58, 1917.

17. Het voelen van geluidstrillingen.

Het blijft voor mij een merkwaardig ding, dat sommige geluiden als voelbare trillingen waar te nemen zijn, indien ze maar op een voldoende groot oppervlak kunnen inwerken. Een blad karton dat ik onder de arm draag, mijn aktentas, een open paraplu, een in de hand gehouden strohoed gaan aan het trillen, zodra bijvoorbeeld een motorfiets met open knalpot voorbijsnelt of een trein puffend in beweging komt. Geschutvuur op grote afstand, dat niet hoorbaar is, merkt men aan het rammelen van deuren en vensters; inzonderheid is dit het geval nabij de binnengrens van de abnormale hoorbaarheidsgordel.[1)]

Dit kan te verklaren zijn, indien de geluiden waarnaar wij luisteren vergezeld zijn door langzame trillingen, in de buurt van de eigen trillingstijd van deze platen. Men kan ook denken aan de mechanische werking der golven samengeperste en verdunde lucht, die toeneemt als het oppervlak van de opvangplaat groter wordt en haar massa geringer.

Hier hangt wellicht mee samen, dat ik soms de trillingen binnen in mijn borst voel, naar waar ze blijkbaar via de luchtpijp overgebracht worden, en waar ze een groot opvangend oppervlak vinden. Zelfs het dreunen van de Turkse trom geeft mij al die eigenaardige gewaarwording.

18. De waarneming van geluiden in een luchtballon.[2)]

Zodra de ballon 50 m hoog is, worden de stemmen der luchtvaarders op de grond nauwelijks meer waargenomen. Omgekeerd echter horen zij de stemmen der achterblijvenden nog op 300 m hoogte! Tot 800 m horen ze de krekels, tot 900 m de kikvorsen, tot 1000 m de kreten van een mens, tot 1200 m het gerammel der wagens op de straatkeien, tot 1400 m een muziekkorps, tot 1600 m hanegekraai en een klok en de kreten ener menigte, tot 1800 m een geweerschot en hondengeblaf, tot 2500 m een trein, tot 3000 m het gefluit van de lokomotief.

Komt men nog hoger, dan verstommen de laatste geluiden, en zweeft men te midden van een grootse, ijzingwekkende stilte.

De goede hoorbaarheid in een luchtballon is voor een gedeelte te wijten aan de normale opwaartse kromming der geluidstralen (fig. 6), maar vermoedelijk ook aan het omhulsel, waarvan de

1) Hemel en Dampkring, **15**, 120, 1918.
2) C. Flammarion, l'Atmosphère, blz. 790. - Humphreys, Physics of the Air, blz. 420.

bovenste helft als holle spiegel werkt en de geluidsgolven nabij de mand verzamelt.[1)] Daarenboven wordt de luchtvaarder niet afgeleid door andere geluiden in zijn omgeving, hij luistert te midden van de stilte; hoezeer hij daardoor in het voordeel is moge blijken uit het feit, dat hij soms de echo van zijn eigen stem hoort tegen het aardoppervlak, terwijl hij er toch niet in slaagt door zijn geroep de aandacht van de mensen daar beneden te trekken.

19. Invloed van de demping op de voortplanting van hoge geluiden.[2)]

Als men elkaar iets van verre toeroept, is de letter *s* bijzonder slecht te horen; ze wordt ook bijna niet teruggekaatst door de echo. Nu is deze klank gekenmerkt door veel hoge boventonen met zeer korte golflengte, en zulke tonen worden *door de viskositeit van de lucht* sterk gedempt. Een toon met een golflengte van 1 cm wordt reeds na 100 m ongeveer tot 1/10 van zijn intensiteit verzwakt. Vandaar wellicht dat de geluiden door de afstand zoveel minder scherp worden. Lieven Duvosel, de toondichter, zegde mij eens, dat de ruwste boerenfanfare wonderlijk mooi klinkt als men ze van verre over de waterspiegel van de Leie hoort.

Van al de echo's die ons oor bereiken
Hebben de verste wel den zoetsten klank.
Béranger.

20. Het geluidstafereel bij sneeuw en bij vorst.

Het oor luisterde naar de stilte van de plechtige lucht,
Geen geluid van rollende wielen noch voetstappen,
En de vele kreten van de drukke morgen kwamen dun en schaars over.

R. Bridges, London Snow.

Waaraan is het zeer bijzondere klankbeeld dat een sneeuwlandschap geeft physisch toe te schrijven? Het is moeilijk aan te nemen dat de *voortplanting* van het geluid door de sneeuw gedempt

1) Waetzmann, Schule des Horchens (Berlin 1934), blz. 27.
2) Rayleigh, Sound, II, 284 (London 1878). Hij bewijst dat de amplitude op afstand *x* van de bron gegeven is door

$$i = i_0 e^{-\frac{8\pi^2 \mu x}{3\lambda^2 \rho V}}$$

, met μ = viscositeit, ρ = dichtheid, V = geluidssnelheid.

zou worden; integendeel (§ 13). Veeleer is het dus de *voortbrenging* der geluiden van de straat die sterk gewijzigd is. Als het vriest, klinken onze stappen veel harder en de wagens maken meer geluid. Waarschijnlijk is het verschil vooral te wijten aan de grotere veerkracht van de harde bevroren bodem. Daarbij komt dan de verhoging der hoorbaarheid door de temperatuurinversie welke 's winters dikwijls heerst. Onderzoek zelf deze en andere wijzigingen in het geluidstafereel uwer gewone omgeving!

21. De echo.

Heel geschikt om echo's te ontdekken zijn twee planken van bijvoorbeeld 140 cm × 15 cm. Slaat men die tegen elkaar, dan krijgt men een vervaarlijke, korte slag die zeer ver hoorbaar is.

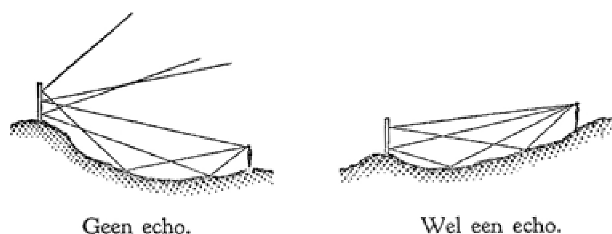


Fig. 8. ‘Grilligheid’ van echo's.

We begeven ons met dit toestel in de heide en laten het af en toe knallen. Het merkwaardige is, dat men nu bijna overal een echo hoort! Een huis of muur; een bos of bomenrij; een heuvel ...., Aan dit laatste voorbeeld kan men duidelijk maken waarom het al of niet optreden van een echo soms van schijnbaar onbelangrijke bijzonderheden in de golving van het terrein afhangt (fig. 8).

Zelfs een eenvoudige telegraafpaal die daar eenzaam in de vlakte staat is voldoende om een merkbare echo te geven. Ter controle nadert men dichter en dichter tot de paal: men hoort dan hoe de echo sneller en sneller op de knal volgt en er tenslotte mee versmelt.

Op zee hoort men de echo soms mooi als ons schip fluitseinen geeft of als de misthoren gaat. Het geluid kan teruggekaatst worden door een ander schip, vooral een zeilschip; of door de kust; of zelfs naar men beweert door een hoge golf. Bij nevel hoort men dikwijls geheel onbegrijpelijke terugkaatsingen,

misschien tegen luchtlagen van gewijzigde temperatuur of vochtigheid.[1)]

Als dezelfde persoon tevens roept en luistert, is *de tussenruimte tussen geluid en echo* bepaald door de afstand van waarnemer tot spiegel en terug; een interval van 1 sekunde komt overeen met een totale weg van 340 m. Om dit interval nauwkeuriger te bepalen, klappen we een aantal malen achtereenvolgens in de handen, op zulke wijze dat de knal en zijn echo in gelijkmatig rhythme afwisselen. Een helper bepaalt dan met het horloge, hoeveel tijd er voor 10 of 20 knallen nodig is:

! ! ! ! ! ! ! slag
! ! ! ! ! ! echo

Men kan echter ook de echo op een ander punt waarnemen dan waar de knal gegeven wordt (fig.9); de ene persoon A geeft het geluidsein, de andere B luistert. De tijdsafstand tussen knal en echo is nu

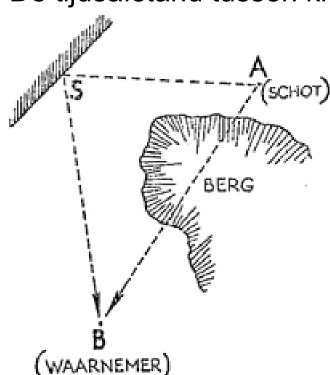


Fig. 9. Echo, waarbij de geluidsbron en de waarnemer zich op verschillende plaatsen bevinden.

$$\frac{ASB\text{-}AB}{340}$$

sek.

Veel te weinig wordt gedacht aan het schatten der *sterkte* van de terugkaatsing. In het geval van fig. 9 was de echo veel sterker dan het oorspronkelijke geluid.

Het belangwekkende van de echo voor de natuurkundige is niet, dat men na terugkaatsing *hetzelfde* geluid hoort, maar integendeel dat het geluid dikwijls *gewijzigd* is in klankkarakter. Het is zaak scherp te luisteren, om zich van de aard en oorsprong dezer wijzigingen rekenschap te geven! In het vervolg zullen een aantal voorbeelden van dergelijke wijzigingen besproken worden (§ 28-34).

22. Enkele bekende Nederlandse echo's.

Al de hier te nomen echo's zijn des te duidelijker naarmate de omgeving rustiger is; 's nachts zijn ze het best te horen. Door de begroeiing van het terrein, door verbouwing enz. kunnen bestaande echo's gewijzigd worden of verdwijnen.

1) Ann. Hydr. **36**, 41, 1908. - Hansa, **47**; 343, 501 en 681; 1910. En veel andere voorbeelden. - De verklaring lijkt twijfelachtig: merkbare terugkaatsing kan slechts optreden als de overgangslaag tussen de twee luchtlagen dunner is dan de golflengte van het geluid, en dit zal zelden het geval zijn.

1. Bij *Velp*, tussen Beekhuizen en de straatweg Arnhem-Zutfen, aan de wandelweg van de A.N.W.B. Arnhem-Ruurloo (rode driehoekjes). Een bordje, dat helaas verroest is en vervallen, geeft plaats en richting van de echo aan. De echo is nogal sterk, maar de tussenruimte klein; naar schatting 0,5 sec, overeenkomend

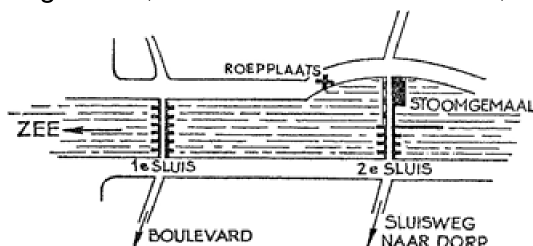


Fig. 10A. Echo te Katwijk.

met ruim 2 lettergrepen. Hij is blijkbaar afkomstig van een rij bomen en een schaapskooi daarvoor. Merkwaardigerwijs is hij ineens verdwenen als men zich aan de andere kant van de wandelweg plaatst, weinige meters

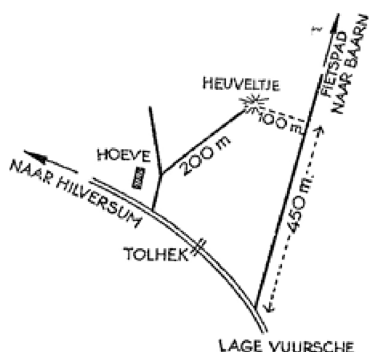


Fig. 10B. Echo te Lage Vuursche.

van het bordje.
2. Te *Muiderberg*. De terugkaatsing gebeurt tegen een muur die de vorm heeft van een cirkelboog; de man die spreekt en degene die luistert worden in elkaar toegevoegde brandpunten geplaatst. Men hoort de stem vergezeld van een dreunende weergalm; van een echte echo is geen sprake.
3. Te *Culemborg*, onder de spoorwegbrug over de Lek, van op het jaagpad op de Culemborgse oever. Tussenruimte 0,8 sec, 3 lettergrepen. Terugkaatsing tegen de eerste pijler; door het gewelf gaat van het geluid weinig verloren en is de sterkte van de echo aanzienlijk.
4. Te *Katwijk* aan de tweede Rijnsluis (fig. 10A); men roepe van op het schelpenpad aan de noordzijde van de Rijn, in de bocht die voor de openingspoorten van het stoomgemaal gegraven is.

De echo wordt teruggekaatst door de (dichte) bogen der openingspoorten; hij is het duidelijkst als men onder aan de dijk roept, 3 meter boven het water. *Bij rustige lucht* hoort men 5 tot 6 lettergrepen terugkaatsen. De dijk draagt ertoe bij dat het geluid niet teveel verzwakt door de grote afstand; maar toch is vrij zwakke wind al voldoende om de echo door zijn geruis te overstemmen.

5. Te *Lage Vuursche*, in het bos van kasteel Drakesteijn (fig. 10B). Men roepe van het heuveltje naar ZW. Tussenruimte 0,8 sec, terugkaatsing door hoge bomen.
6. De echoput te *Hoog Soeren* bij Apeldoorn, aan de straatweg Apeldoorn-Amersfoort. De put is ongeveer 80 m diep, en kaatst het geluid terug met een tussenruimte van bijna 0,5 sec. De terugkaatsing is veel sterker dan bij elke andere echo, daar de zijdelingse uitbreiding van de geluidsgolven hier vermeden is. Het geluid van een mannenstem wordt volmaakt weergegeven; ik verbeeld me dat de echo van een vrouwestem hoger schijnt dan het oorspronkelijke geluid, doordat de boventonen relatief versterkt worden; de *s* keert sissender terug dan ze uitgesproken was. Deze eigenaardigheden kunnen berusten op het moeilijker doordringen van lange golven in een ‘spleet,’ waarvan de afmeting vergelijkbaar is met hun golflengte.
7. Te *Berg en Dal*, aan de ‘Uilenput,’ hoek Zevenheuvelenweg en weg naar Meerwijk. Er mag geen wind zijn en geen verkeer. Tussenruimte ongeveer 1 sec.
8. Op de straatweg *Stavoren*-Warns, ongeveer 150 m voorbij station Stavoren, kan men de misthoren in de haven horen loeien, gevolgd door wel 5 echo's; deze schijnen te wijten aan terugkaatsing door boerderijen in de buurt.
9. Aan de straatweg *Alkmaar-Heilo*, tegen het buiten ‘Nijenburg’ van Jhr. van Foreest, dat zich ongeveer 200 m ten Oosten van de straatweg af bevindt. Tegenover dit buiten is een prachtige beukenlaan, waarin men de echo nog op grote afstand horen kan ('s nachts tot 500 m).

23. Echo tegen een boswand.

Een bos kaatst het geluid terug, maar de echo is niet zo kort en knallend als het oorspronkelijke geluid, hij klinkt integendeel *daverend*. Verklaring: een deel van het geluid wordt door de buitenste bomenrij teruggekaatst, een ander deel door de volgende rij, de rest door nog diepere rijen.

Toch is de diepte tot waar het geluid doordringt vóór het teruggekaatst wordt vrij gering: laat eens een helper gelijkmatig ons

knaltoestel bedienen, en ga in het bos luisteren; verrassend snel nadat men zich tussen de bomen begeven heeft hoort men het geluid uitsterven. Dat bomen als een vrij gladde geluidsspiegel kunnen werken, hangt samen met het feit dat het geluid zulk een grote golflengte heeft, zodat oneffenheden van de bomenrij slechts een paar golflengten groot zijn. (Vergelijk met het licht: terugkaatsing op een spiegel met krasjes van 0,001 mm!).

Ik krijg de indruk dat de daverende echo *zeer* sterk is vergeleken met de geluidsbron; de vergelijking tussen twee knallen van zo verschillend karakter is echter moeilijk. Metingen met nauwkeurige instrumenten hebben aangetoond dat een boswand gemiddeld 17% van het geluid terugkaatst.

24. Echo van vogelgefluit.

Een ‘oorgetuige’ verzekert mij dat hij in Gelderland eens duidelijk de wondermooie echo gehoord heeft van nachtegalenzang. Dat dit niet onmogelijk is, schijnt ook wel te volgen uit een vers van Staring, die zo goed de natuur heeft waargenomen:

Van echo vervangen,
Bij 't rijzen der maan,
Heft gij nog uw zangen,
O nachtegaal, aan.

Wordsworth vertelt van de echo van de koekoekroep.[1)]

25. Weergalm.

Als het teruggekaatste geluid zo snel terugkeert dat het niet afzonderlijk meer te onderscheiden is, spreken we van ‘weergalm.’

De klank onzer voetstappen wisselt voortdurend naarmate de omgeving er meer of minder van terugkaatst. Zeer duidelijk was het vooral 's nachts in een bepaald geval, waarin de weg afwisselend door een haag en door een grote poort, dan weer door een haag en weer door een hoge poort afgezet was.

Als een trein voorbij een huisje, een boom of een enkele telegraafpaal rijdt, hoort men bij het voorbijrijden een geruis, een fluistering. Open het raampje en steek het hoofd een weinig uit; met gesloten ogen kunt U uit de wijziging van het treingeluid precies aangeven op welk ogenblik een telegraafpaal voorbijkomt.

Hetzelfde is ook zeer duidelijk in een auto of op de fiets. Soms heb ik dit verschijnsel opvallend gehoord, op een fietspad met

1) A Guide to the District of the Lakes (1810 - 1815).

goed knetterend grint, dat van afstand tot afstand met houten paaltjes afgezet was. Wij dachten eerst dat een onzer fietswielen aanliep, zo sterk was het regelmatig terugkerend geruis! Het ruisend karakter van deze weergalm is verklaarbaar, omdat de telegraafpaal of de paaltjes langs het fietspad vrij dun zijn, vergeleken met de golflengte van het geluid, en dus vooral hoge tonen zullen terugkaatsen.

In een tunnel is het lawaai van de trein haast onverdragelijk, omdat elke gerucht talloze malen teruggekaatst wordt.

De knal van een geweer klinkt geheel verschillend volgens het landschap. Als een jager van akkerland naar heidevelden overgaat, schijnt hem het schot zo zwak dat hij denkt slecht te hebben geladen.[1)]

26. Echo onder gewelven.

Merkwaardige echo's zijn dikwijls te horen onder de gewelven van grote bruggen. Al naar gelang van de plaats van geluidsbron en waarnemer of de vorm van het gewelf krijgt men de eigenaardigste verschijnselen, zo

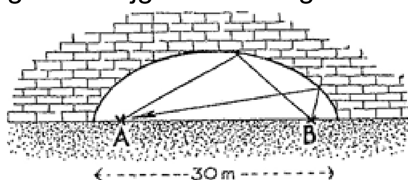


Fig. 11. Echo onder een half-elliptisch gewelf.

verscheiden, dat het ondoenlijk is er een volledige beschrijving van te geven.

Het gewelf van de Stropbrug te Gent, waar de trein over rijdt, heeft min of meer de vorm ener halve ellips. Geluidstralen uit A komen samen in B, waar ze tegen de grond terugkaatsen en opnieuw uiteengaan om zich weer in A te verenigen (fig. 11); dit spel herhaalt zich een aantal malen. Klapt men in de handen, dan hoort men tot 7 goed gescheiden herhalingen van het geluid; ik schatte dat er 5,5 herhalingen per sekunde waren, hetgeen goed klopt met de berekening:

$$\frac{340}{2 \times 30} = 5,8$$

.

Onder de spoorbrug van de lijn Gent-Wetteren, over de Schelde, ongeveer 1 km ten zuiden van Gent, zijn de bogen schuin in de brug aangebracht. In de aslijn wordt ieder handgeklap gevolgd door een soort ratelende *r*, hoger en helderder van klank naarmate

1) Houzeau, L'Etude de la Nature, blz. 58.

de geluidsbron dichter tot de grond nadert. Bij de zijkanten hoort men een dubbele echo.

Voor gewelven van geringe afmeting: vgl. § 31.

27. Fluisterkommen.

In sommige duinvalleien zijn geluidsverschijnselen waar te nemen, liefst in de rustige lucht van een stille avond. Men zoeke valleien die min of

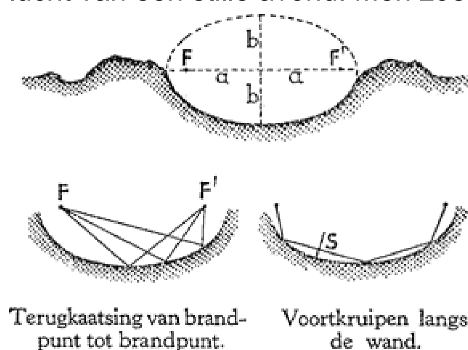


Fig. 12. Fluisterkom in de duinen.

meer de vorm hebben van een ellipsoïde (fig. 12); zwakke geluiden in het brandpunt F, zoals het tikken van een wekker, gefluisterde woorden (de rug naar F' keren!), enz. zijn dan verrassend goed te horen in het andere brandpunt F'. Het komt er op aan zo nauwkeurig mogelijk de twee gunstigste punten op te zoeken, want daarbuiten wordt de geluidssterkte snel geringer; als de lange en de korte as der ellips naar schatting de lengten 2*a* en 2*b* hebben, is de afstand der brandpunten van elkaar: FF' = $2c = 2\sqrt{a^2-b^2}$.

Een dergelijke fluisterkom is indertijd door Ir. Pot ontdekt te Bergen a/Zee, (N.H.), bij den Fransman, dichtbij de Uilevangersweg. Het zou de moeite waard zijn na te gaan (fig. 12), of we hier wel met een rechtstreekse terugkaatsing te maken hebben, zoals bij brandspiegels; of veeleer met een ‘voortkruipen’ van het geluid langs de wand, zoals dit in de beroemde fluistergalerij van de St. Paul's kathedraal te Londen optreedt.[1] De ligging der punten van grootste hoorbaarheid kan hieromtrent aanwijzing geven; blijft de hoorbaarheid ongeveer even groot als men een scherm in S plaatst?

28. Harmonische echo's.

Men noemt beroemde echo's, die in plaats van het oorspronkelijke geluid de oktaaf, de kwint, de terts terugkaatsen! Toch

1) Rayleigh, Sound, II, blz. 115 (London 1878).

is dit theoretisch onmogelijk: *een echo kan geen nieuwe tonen doen ontstaan*. Maar een echo kan wel sommige bestanddelen van de uitgezonden toon versterken of verzwakken, bijvoorbeeld als de terugkaatsende wand een regelmatige periodiciteit vertoont. Een ander goed waargenomen geval is het volgende.[1)]

Op een landgoed in Schotland was er een dennebos, dat het geluid ener vrouwestem een oktaaf hoger weergaf, dat ener mannestem echter onveranderd liet! Mogelijke verklaring: de afstanden en dikte der bomen waren blijkbaar zo, dat de hoge tonen sterker teruggekaatst werden dan de lage; misschien droegen daar ook de naalden van de naaldbomen het hunne toe bij. Nu zijn de meeste klanken vergezeld van boventonen; in 't geluid van de vrouwestem moet de oktaaf vrij sterk geweest zijn, dan is het begrijpelijk dat deze bij terugkaatsing ging overheersen tegenover de grondtoon. De mannestem was armer aan boventonen. Is deze verklaring de juiste, dan zou het geluid ook op kenmerkende wijze van karakter veranderd moeten zijn voor een waarnemer die in het bos zelf luistert.

29. Fluitende echo's.[2)]

Een natuurwaarnemer let altijd onbewust op de klank van zijn stappen, die verschillend is al naar de aard van de weg en de omgeving. Vooral

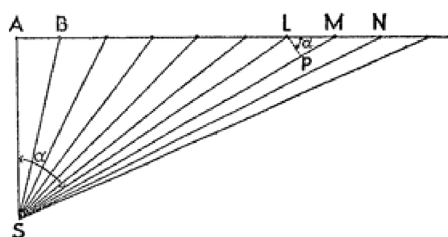


Fig. 13. Het ontstaan van een fluitende echo.

's avonds, als alles rustig is, bemerken we soms hoe die klank ineens heel eigenaardig, haast metallisch wordt: elke stap lijkt ongeveer op het geluid ‘tjioe.’ Het blijkt dan altijd dat er *een hek* langs de weg loopt, en dit is bij nader onderzoek de oorzaak van de ‘fluitende echo.’ Het hek moet tenminste een meter of vier lang zijn, de afstand der staven niet te klein maar ook niet te groot. Verklaring (fig. 13): het geluid van de stap in S wordt achtereenvolgens door de staven A, B, ...L, M, N, ... teruggekaatst (liever: afgebogen; beginsel van

1) Rayleigh, Nat. **8**, 319, 1873. - Papers, **1**, 188.
2) Ann. d. Phys. **94**, 357 en 530, 1855. - H. Groot, de Natuur, 1924.

Huygens!). Die zwakke echo's bereiken ons oor niet tegelijk, maar een voor een, omdat de wegen SA, SB, ... SL, SM, ... geleidelijk groter worden. De driehoeken LPM, SAM zijn gelijkvormig, dus is het wegverschil voor twee opeenvolgende latjes: 2 PM = 2 LM. sin *α*; en het aantal trillingen van het teruggekaatste geluid wordt

$$\frac{34000}{2LM.\ \sin \alpha}$$

. Bij elke stap worden eerst de dichtstbijzijnde, later de verdere staven getroffen; sin *a* is eerst nul, neemt toe en nadert tot 1. Men moet dus eerst een zeer hoge toon horen, die snel lager wordt en tot een constante grenswaarde nadert; als de staven bv. 17 cm van elkaar verwijderd zijn, is het trillingsgetal van dit ‘eindgeluid’ nog 1000, dus zeer hoog. Dit is inderdaad ongeveer wat men hoort, maar de snelle toonwisseling laat niet toe nauwkeurig de hoogte van het geluid te bepalen.

Fluitende echo's zijn ook mooi te horen onder gewelven van golfijzer zoals men ze bv. in sommige stations vindt (den Bosch, Baarn C.S., Utrecht Buurtstation). Het verschijnsel is zeer duidelijk te horen als men nauwkeurig onder het midden van het gewelf loopt, 0.50 m daarnaast echter is het al onmerkbaar. Voor deze waarneming moet het in 't station enigszins stil zijn: 's nachts is de beste tijd.

> Merk op dat de toonhoogte van deze begeleidende echo niet afhangt van het toevallige geruis van de voetstap, maar geheel door de periode van het hek bepaald wordt.
> Welke invloed heeft het of de waarnemer dichter bij het hek of verder er vandaan staat?
> Hoe wordt het als een helper het geluid verwekt, terwijl u zelf op een ander punt luistert?
> Vóór het station te Velsen staat een half-cirkelvormig hek; dat heeft zeer merkwaardige akoestische eigenschappen: als men buiten het centrum staat hoort men een fluitende echo die hoog begint, een minimum-trillingsgetal bereikt en tenslotte weer hoog eindigt; stelt men zich in het centrum, dan is de echo er wèl, maar 't gefluit is weg.

30. Echo van een trap.

‘Ik wil hier een tamelijk merkwaardige waarneming aan toevoegen, die ik eens maakte, toen ik op het slot te Chantilly de la Cour was, bij het ruiterstandbeeld. Men daalt daar langs een trap van .... treden naar de tuin af, waar een fontein voortdurend ruist. Als men beneden is gekomen en zich tussen de trap en de fontein plaatst, hoort men van de kant van de trap een weergalm die een bepaalde muzikale toon heeft, en die

voortduurt zolang de fontein spuit. Men wist niet vanwaar die toon kwam of gaf er onwaarschijnlijke verklaringen voor, zodat ik lust kreeg er een betere te zoeken. Ik vond weldra dat hij ontstond door de terugkaatsing van het geruis der fontein tegen de treden van de trap. Want elk geluid, of veeleer elk gerucht, dat met gelijke, zeer kleine, tussenruimten herhaald wordt, geeft een muzikale toon; evenzo wordt de toon van een orgelpijp bepaald door haar lengte, omdat de luchttrilling telkens met regelmatige kleine tussenruimten terugkeert, overeenkomend met de tijd die ze nodig heeft om de pijp heen en terug te doorlopen. Zo stelde ik mij ook voor dat elk onregelmatigheidje in het geruis van de fontein teruggekaatst werd tegen de treden van de trap, en dat de terugkaatsing van elke trede des te later het oor bereikte, naarmate die trede verder af was, terwijl het tijdsverschil precies gelijk was aan de tijd die de geluidsgolven nodig hebben om de breedte van een trede heen en terug af te leggen. Nadat ik die breedte gemeten had, - ze bedroeg 17 duim -, maakte ik een papieren koker van diezelfde lengte, en bevond dat hij dezelfde toon gaf die men onder aan de trap hoorde.

Zoals ik reeds zei vond ik ook dat men de toon niet meer hoorde zodra de fontein ophield met spuiten. En toen ik eens gelegenheid had in de winter naar Chantilly te gaan, en er veel sneeuw gevallen was die aan de treden hun vorm ontnam, merkte ik op dat men niets hoorde, hoewel de fontein op de gewone wijze spoot en ruiste.'

Chr. Huygens, Oeuvres Complètes, **10**, 570, 1693.
(Correspondance).

Ik heb beproefd het verschijnsel te Chantilly terug te vinden. De fontein kon die dag toevallig niet in werking gezet worden, maar het was voldoende onder aan de trap in de handen te klappen om een zeer muzikale echo te horen, die ik op f^1 of 350 trillingen per sekunde schatte (§ 1). Buitengewoon helder en luid werd deze galm echter wanneer men zich op halve hoogte plaatste, waar de trap zich vertakt en het geluid van 3 verschillende zijden teruggekaatst wordt; hij was dan iets hoger, wellicht een g^1 van 385 trillingen. Inderdaad zijn alleen de onderste treden ongeveer 46 cm breed, precies volgens de opgave van Huygens;[1)] de bovenste meten slechts 40 cm. De trillingsgetallen 370 en 452

1) Een duim = 2,7 cm.

die daaruit volgen kloppen niet slecht met de rechtstreeks geschatte, vooral als men bedenkt hoe moeilijk het is absolute toonhoogten te bepalen.

Uit een oude plaat blijkt wel dat de trap sedertdien wat veranderd is, en dat de fontein waarschijnlijk niet precies meer op de vroegere plaats spuit.

Een dergelijke muzikale reflexietoon moet ook te horen zijn op de staatsietrap van het Walhalla te Regensburg,[1] en in het stadion der universiteit te Princeton. Naar mijn ervaring komt hij op een aantal plaatsen voor, waarschijnlijk overal waar er een ietwat brede trap is met tenminste een 15-tal treden. Verdere waarnemingen zijn gewenst.

> De werking van de trap bij dit verschijnsel is te vergelijken met die van een reflexie-echelon voor lichtgolven.

31. Gonzende straatjes en gewelven.[2]

In zeer nauwe steegjes geven onze stappen een mooi gonzend geluid, maar alleen als we precies in het midden lopen. We merken deze bijzondere

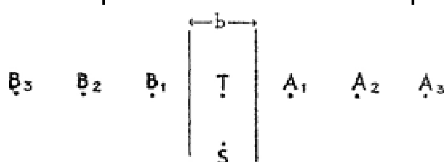


Fig. 14. Het gonzende straatje.

galm het best, wanneer het steegje plaatselijk iets verwijdt of vernauwt: dan daalt of stijgt de toon van het gegons.

De verklaring ligt voor de hand (fig. 14; denk aan optische weerspiegeling tussen twee evenwijdige spiegels!). Het is alsof er een aantal wandelaars in A_1, A_2, A_3, ..., B_1, B_2, B_3, ... tegelijk op de grond stampten, van elkaar gescheiden door afstanden b = de breedte van het straatje. De knallen bereiken nu achtereenvolgens de waarnemer in T, met gelijke tussenruimten, en wel komen er

$$\frac{340}{b\,(\text{meter})}$$

per sekunde aan. Vergelijk de aldus berekende met de waargenomen toonhoogte!

Als men *een ander* op enige meters afstand op de grond laat stampen, in het midden van het straatje, hoort men telkens hoe het geluid eerst sneller, dan langzamer zakt; dus ongeveer

1) Günther, Sitzungsber. d. Akad. München, **31**, 215, 1901.
2) Ann. d. Phys. 101, 105, 1857.

zoals bij de fluitende echo's aan hekken. De verklaring is natuurlijk een dergelijke: de waarnemer in S hoort de geluidsbron en haar spiegelbeelden met toenemende tussenruimten (vgl. fig. 14 met fig. 13).

Gonzen van de stappen hoort men ook mooi onder het halfcirkelvormige gewelf van sommige bruggen of gangen, wanneer de straal vrij klein is, zodat men niet de afzonderlijke terugkaatsingen kan onderscheiden. Is *r* de straal van het gewelf in meters, dan wordt het trillingsgetal: N = 340 / 2*r*. Vgl ook § 26.

32. Zingende beekjes, valleien, wouden.[1)]

Beekjes, die tussen rotsblokken ruisen geven soms een zeer zingende toon, muzikaal en klankvol, vrij constant van toonhoogte.

Soms geeft een rotskloof, soms de gehele vallei een dergelijke klank. Dit schijnt toe te schrijven aan hetzelfde verschijnsel der snel herhaalde terugkaatsingen als in de gonzende straatjes - een verschijnsel dat natuurlijk even goed genoemd kan worden: het meetrillen van de ‘eigen toon,’ van de rotskloof of de vallei. Dikwijls zou die eigen toon te diep zijn, en moet men veeleer denken aan het meetrillen van boventonen. In enkele uitzonderlijke gevallen heeft men in een woud zonderlinge, bijna muzikale geluiden gehoord; het beroemdste voorbeeld is dat van Thronecken, niet ver van Trier. Zulke bossen bedekken bijna altijd de hellingen van valleien; het lijkt wel waarschijnlijk dat de geluiden zeer nauw verwant zijn aan die der zingende dalen, en veroorzaakt worden door het geluid van een beek, versterkt door de resonantie van de lucht.

33. Het verschijnsel van Doppler.

Geluidsbronnen die naar ons toe komen schijnen hoger van toon; geluidsbronnen die zich van ons verwijderen, lager; het trillingsgetal verandert ongeveer in de verhouding

$$\frac{V \pm v}{V} = 1 \pm \frac{\text{snelheid geluidsbron}}{\text{snelheid geluid}}.$$

Zeer duidelijk hoort men het verschijnsel, als men, zelf in een trein zittend, een andere trein kruist die net fluit. Op het ogenblik der kruising hoort men het geluid ineens naar

1) S. Günther, Sitzungsber. Akad. München, 31, 213, 1901. - Reuleaux: Das singende Thal bei Thronecken (Koblentz 1880).

beneden verspringen over bijvoorbeeld 1½ toon (*es* - *c*). De verhouding der trillingsgetallen is dus 1,189 (vgl. §1); de snelheid der twee treinen ten opzichte van elkaar was 0,189 × 340 × ½ = 32 m/sec of 115 km per uur, elke trein had gemiddeld een snelheid van 58 km per uur. Als men stilstaat terwijl de fluitende trein beweegt, is het effekt natuurlijk maar de helft.

Bij onze Dieseltreinen hoort men bij het kruisen een eigenaardig kort haaltje, dat insgelijks door de Doppler-sprong ontstaat; maar het geluid klinkt zo merkwaardig omdat het sein kort is en de snelheid aanzienlijk.

Evenzo is het verschijnsel van Doppler te horen aan voorbijschietende auto's, zowel aan hun geluidssignalen als aan het gezoem van hun motor. Zelfs de bel van een tram of van een fiets, die net voor het kruisen aan het trillen is gegaan en nog naklinkt, verspringt merkbaar van toon op het ogenblik dat deze vervoermiddelen ons voorbijrijden.

> Merk op hoe plotseling de omslag gebeurt als de auto vlak naast ons voorbijschiet en hoeveel geleidelijker als wij ons op enige afstand ervan bevinden. Waarom?

34. Verschijnsel van Doppler bij een echo.

Een [trein rijdt van ons weg en fluit; de echo herhaalt, maar een halve toon

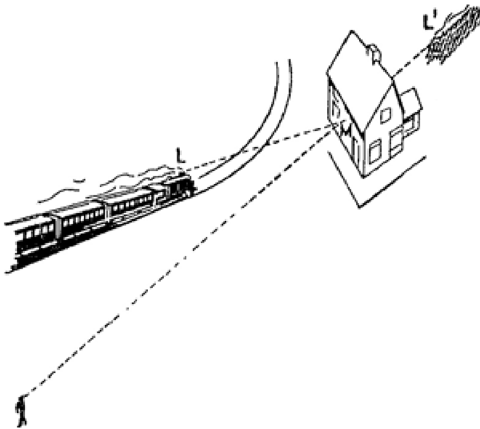


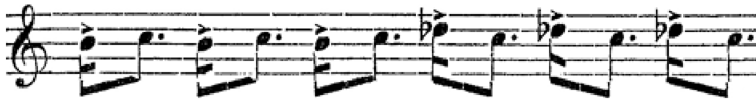
Fig. 15. Het verschijnsel van Doppler bij een echo.

lager.[1)] Hoe komt dat? - Wel, de muur M van een huis (of een heuvel) moge 't geluid terugkaatsen. De echo komt dus van een ‘spiegelbeeld’ L' der lokomotief L, en dit spiegelbeeld beweegt in tegengestelde rich ting van de lokomotief zelf; de waarnemer moet dus de ene lokomotief te hoog, de andere te laag horen (fig. 15).

1) Dit mooie verschijnsel werd het eerst door Richarz in de Brennerpas ontdekt, maar is ook in ons vlakke land dagelijks waar te nemen.

Is de terugkaatsende wand aan de andere zijde van den waarnemer, ten opzichte van de lokomotief, dan is de echo even hoog als het oorspronkelijke geluid. - Hoe is het als de lokomotief op ons toe komt? En als men zich zelf op de fluitende trein bevindt? Als een rijdende trein lang fluit, op een plaats waar de echo hoger of lager zou klinken, kan men *zwevingen* horen tussen het fluitsein en de terugkaatsing ervan.

Als de lokomotief voorzien is van een bel, zoals sommige onzer buurttreintjes, en hij komt in de nabijheid van huizen die een zwakke echo geven, dan krijgt elk zijner belslagen een naklank die soms hoger, soms lager ligt, al naar gelang van de plaats van de terugkaatsende muur en de richting waarin de trein rijdt:



Nog op een andere wijze is het effekt te horen.[1)] De slagen van een kleppende kerkklok worden teruggekaatst door de gevel van een huis, en u fietst op het huis toe. Dan is onmiddellijk hoorbaar dat het rechtstreekse geluid lager, het teruggekaatste (later aankomende) hoger klinkt.

35. Muzikaal geruis, door interferentie ontstaand.

De stoom waarmee een trein 's winters verwarmd wordt, ontsnapt achter de laatste wagon en stroomt ruisend uit. Dat daarin een bepaalde toon overheerst, merkt men pas als men dichterbij komt, want dan hoort men hoe 't geruis lager wordt; en omgekeerd. Als men dichtbij staat en bukt, stijgt de toon sterk; hij *blijft* hoog zolang men gebukt staat. Verklaring (fig. 16): de aarde weerkaatst het geluid van de ruisende pijp P en geeft daarvan een 'spiegelbeeld' P'. De waarnemer W hoort de golven uit P en P' met een zeker faseverschil; onder de vele tonen uit welker samenvoeging het geruis bestaat, zou men verwachten dat *die* versterkt worden, waarvoor het wegverschil WP'-WP juist één golflengte λ is. Bedenk echter, dat bij terugkaatsing tegen een vaste wand de fase van de golf verspringt; in werkelijkheid moet dus WP'-WP = ½ λ (of 3/2 λ, 5/2 λ, ...). De oppervlakken van gelijk wegverschil zijn hyperboloiden; als men zich

1) Opgemerkt door een leerling van 'de Werkplaats' te Bilthoven.

min of meer verwijdert of bukt gaat men van het ene oppervlak naar het andere over, en kan ook waarnemen dat de oppervlakken van gelijke toonhoogte inderdaad

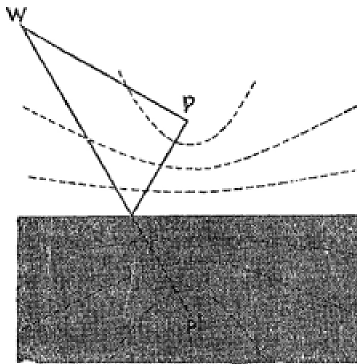


Fig. 16. Interferentie van een geluidsbron met zijn spiegelbeeld.

de getekende vorm hebben. Staat de waarnemer vlak bij de pijp, dan is het wegverschil eenvoudig tweemaal de hoogte van de pijp boven de grond. - Dat alles komt aardig uit. Toets de absolute toonhoogte!

Het verschijnsel is een soort ‘spiegelproef van Fresnel’ met één spiegel (= de aarde), de verschillende toonhoogten komen overeen met de gekleurde interferentiestrepen. Eigenlijk is het een akoestisch analogon van de interferentieproef van Lloyd.

Het schijnt dat men de geluidsvariaties ook verkrijgen kan door een plank op verschillende afstanden onder de pijp te houden. Beproef dit!

Hetzelfde verschijnsel hoort men ook, als stoom uit de veiligheidsklep boven op de lokomotief stroomt, en men dichterbij of verderaf gaat staan. In een dergelijk geval hoorde ik eens de toon van de ene harmonische boventoon naar de andere verspringen, achtereenvolgens de reeks (§ 2) doorlopend; blijkbaar gaf de stoom hier dus geen geruis, maar een zuivere toon, die echter rijk aan sterke boventonen was: zij werden één voor één door interferentie versterkt.

Meermalen heb ik het effekt zeer mooi waargenomen, als huisschilders op een ladder aan 't werk waren met een benzinebrander. De vlam gaf een zacht geruis, dat ik in 't voorbijgaan eerst hoorde dalen, dan weer stijgen. Bewogen zij de vlam naar of van de muur, dan hoorde ik geen verschil; 't was dus wel in hoofdzaak de grond die terugkaatste, en niet de gevel van het huis. Een benzinebrander die ongeveer 50 cm hoog boven de grond stond, vertoonde insgelijks het effekt. - Een verrassend duidelijk verschijnsel kan men opmerken[1)] als in 't vrije veld een vliegtuig

1) Devé, C.R. **174**, 1010, 1922.

boven ons hoofd vliegt, en wij snel bukken of hurken. We horen dan ineens de toon over één, zelfs twee oktaven stijgen! Ook hier valt direkt op dat het geluid even hoog blijft als we gehurkt blijven, zodat elke verklaring door Doppler-effekt onmiddellijk uitgesloten is. Het effekt is geheel en al hetzelfde als dat van de ruisende stroom; het wegverschil is $2h\cos\zeta$, wanneer h de hoogte van ons oor boven de grond, ζ de zenithsafstand van het vliegtuig voorstellen. Als een vliegtuig over ons heenvliegt, met ongeveer constante snelheid, horen we de toon geleidelijk dalen, constant worden als het vliegtuig boven ons hoofd is, en dan weer geleidelijk stijgen; de waarneming wordt bijzonder duidelijk als men af en toe even neerhurkt en weer opstaat, zodat de juiste hoogte van de toon ons telkens tot bewustzijn gebracht wordt. Men kan dikwijls de toon volgen tot het vliegtuig bijna in de verte verdwenen is.

Goede waarnemers hebben gehoord[1)] dat het ruisen van een waterval of van een stuw, van de trein, of zelfs van de bladeren der bomen (!), van hoogte verandert als men dichtbij een muur staat (niet verder dan 1 meter van u af), en dan tot die muur nadert of zich ervan verwijdert. In dit geval is dus de muur het terugkaatsend oppervlak. Hetzelfde hoort men als men op een rustige nacht vóór de gevel van een huis krachtig met de hakken op de grond stampt.[2)] Vgl. ook § 48.

Houd de hand naast het hoofd, de vlakke zijde naar het hoofd gekeerd, eerst op een 10-tal cm van het oor, dan afwisselend iets dichter of verder. In het geruis van een voorbijrijdende auto b.v. hoort u nu een hoge fluittoon, die beurtelings daalt en stijgt. De geluidsbron en het spiegelbeeld dat de hand ervan terugkaatst interfereren samen, de toon die versterkt wordt heeft een golflengte van slechts enkele cm. Een echte **geluidspektroskoop** voor het opsporen van hoge tonen!

36. Van welke richting komt het geluid?[3)]

Zoek bij windstil weer een vlak, open terrein, waar geen huizen, geen bomen, noch struiken staan. De waarnemer laat zich blinddoeken, en een helper geeft korte geluidsseinen door twee pot-

1) Savart, C.R. **7**, 1068, 1838. - Baumgarten, Ber. naturw. med. Ver. Innsbruck, **7**, 116, 1876. Soms zeer duidelijk 's nachts bij een sluis.
2) Waetzmann, Schule des Horchens (Berlin 1934), blz. 24.
3) Aardige proeven en spelen in open lucht over dit onderwerp worden beschreven in E. Waetzmann, Schule des Horchens (Berlin 1934). Jammer genoeg is het doel van dit boekje zuiver militaristisch.

loden tegen elkaar te slaan. Het is verrassend hoe een weinig oefening al voldoende is om met vrij grote zekerheid aan te geven van waar het geluid komt. Daarna blijft de helper staan, en geeft een reeks seinen van uit hetzelfde punt, op grotere afstand (15 meter), bv. door telkens in de handen te klappen; de waarnemer draait langzaam het hoofd naar rechts, dan naar links, dan weer terug, tot hij de indruk heeft dat de geluidsbron precies midden voor hem ligt. Met enige oefening bereikt men daarbij een nauwkeurigheid van ongeveer 3°.

Men heeft kunnen aantonen, dat we deze indruk van richting krijgen, doordat we zo uiterst nauwkeurig waarnemen of het geluidssein iets vroeger bij het ene dan bij het andere oor aankomt. Een wegverschil van slechts 1 cm is al te herkennen, al komt het tijdsverschil slechts met 1/34000 sec. overeen! Bij lang aangehouden tonen ontstaat de indruk, doordat het ene oor het geluid in een andere phase waarneemt dan het andere; men ziet gemakkelijk in, dat deze waarneming moeilijker wordt voor geluiden van zeer korte golflengte: vandaar dat men zo moeilijk kan aangeven wáár een krekel zit die men hoort sjirpen. Voor zulke zeer hoge geluiden beoordeelt men trouwens de richting veeleer naar het intensiteitsverschil: want hun golven zijn kort en buigen weinig ‘om de hoek,’ ons hoofd werpt dus een scherpe schaduw, en het geluid is veel sterker voor het ene oor dan voor het andere.

Heel merkwaardig is de richtingsindruk die men krijgt bij het horen onder water. Begeef u in de zweminrichting, zo ver mogelijk van alle mensen, en buk u tot uw oren onder water zijn. De geluidsseinen onder water die een helper op afstand geeft, hoort men nu veel dichter bij het symetrievlak van het lichaam dan met de werkelijkheid overeenkomt. Zelfs als de seinen geheel en al rechts of links gegeven worden, hoort men ze schuin voor zich uit. - Verklaring: in water is de snelheid van het geluid ongeveer 4 maal zo groot als in lucht; de tijdsverschillen die de twee oren waarnemen zijn dus 4 maal kleiner dan in lucht, hetgeen de indruk maakt dat de geluidsbron naar het middenvlak verschoven is.

Het bepalen van de richting van een geluid dat uit de hoogte komt is zeer moeilijk. Eigenlijk zou dit alleen kunnen als men zich op de grond legde en zich dan om de lengte-as van het lichaam ging draaien, tot symmetrie bereikt is; maar die houding is zo onnatuurlijk, en de terugkaatsing door de aarde zo storend, dat men niet veel bereikt. - Beproef een leeuwerik te vinden die hoog in de lucht tiereliert!

De geluiden der natuur.

De stilte der natuur is vol geluiden....
H. Roland Holst, de Nieuwe Geboort.

Om de natuur te horen, moeten we zelf stil kunnen zijn.
Te midden van het lawaai der grote stad,
buiten in 't vrije veld bij stormweer,
tijdens een grote volksvergadering,
of boven op de top van een berg,
willen we gaarne een wijle roerloos luisteren, ons aandachtig bewust worden van alle geluiden en voor elk daarvan de oorsprong zoeken, om daarna hun machtige samenklank in ons op te nemen.

37. Geruis, gerucht, geraas.

Lawaai is de ware moordenaar der gedachten.
Schopenhauer.

Deze geluiden verschillen in hoogte, sterkte, duur, ongelijkmatigheid. Ze zijn 'zacht, afgebroken, ruw, hees, verschrikkend, oorverdovend.' Vergelijk het geratel van een lichte kar met het gerommel van een zware wagen over de plaveistenen; een pistoolschot en een kanonschot; 't gerinkel van een bergstroom en 't gedreun van een waterval. Bepaal het toonelement in 't gehuil van de wind, het gegons van een zwerm insecten, 't gezoem van pratende stemmen in een drukke zaal.

De grens tussen geluid en gerucht is niet scherp te trekken. Gehamer op één aambeeld klinkt niet muzikaal; maar Wagner gebruikt een reeks afgestemde aambeelden in Rheingold, en door het verschil wordt de toonhoogte duidelijk (vgl. § 31).

Ter onderscheiding van allerlei soorten gerucht heeft Davidson in 1900 de schaal samengesteld die zijn naam draagt:[1)]

1) Phil. Mag. **1**, 31, 1900.

I. Rijtuigen, treinen in tunnels of over ijzeren bruggen.
II. Donder: soms een ontploffing, dof, zwaar, gedoofd of gedempt, meestal echter een diepe, lage toon, ver.
III. Instorten van een muur; omwerpen van een lading bakstenen.
IV. Val van zware voorwerpen (bomen, timmerwerk; slaan van deuren).
V. Ontploffing van ketel, dynamiet, vuurpijl; weergalm van kanonschoten in de verte.
VI. Verschillende andere geruchten; bijvoorbeeld: paardengetrappel, gevecht van zware mannen op de bovenverdieping van een huis, gerucht van de verre branding, geknetter van fijne regen of hagel op de bladeren, verschuiving van grote rotsmassa's.

Beproef al dergelijke geluiden in de schaal van Davidson in te delen! Laat geen gelegenheid voorbijgaan om hun eigenaardigheden te onderscheiden! Vergelijk een sterk, maar ververwijderd gerucht met een zwak, maar nabij gerucht, en bemerk sommige opvallende gelijkenissen, zoals er in de schaal van Davidson voorkomen. - Dergelijke oefeningen verhogen niet alleen uw betrouwbaarheid als waarnemer, ze verrijken u met nieuwe indrukken en doen u genieten van de eindeloze verscheidenheid der natuur.

38. Het onderscheiden van verschillende soorten knallen.[1)]

Verschillende belangwelkende verschijnselen worden door knallen begeleid. Hoe zal men nu de oorzaak van zulk een geluid opsporen, eventueel ook met behulp van waarnemingen van anderen die men in de kranten vermeld vindt?

Donder is te herkennen aan de lange duur van het gerucht. Ook is hij meestal slechts hoorbaar over een klein gebied.

Kanonschoten volgen elkaar dikwijls op met ongeveer gelijke sterkte. De waarnemer krijgt duidelijk de indruk dat het geluid door de lucht komt. Van hoe verder de berichten afkomstig zijn, met hoe meer stelligheid ze aan kanonschoten worden toegeschreven.

Meteoorstenen geven soms een, soms meer knallen. Het hoorbaarheidsgebied is soms langwerpig; 't geluid is veel beter merkbaar dan de voelbare trilling. Kijk op het weerkaartje of de zelfregistrerende barograaf niet een hobbel heeft opgetekend toen de meteoorsteen voorbijkwam. Dikwijls ziet men de meteoorsteen zelf of althans zijn lichtglans.

1) Ch. Davidson, Nat. **60**, 138, 1899. - Beitr. z. Geoph. **12**, 485, 1913.

Onderaardse instortingen, zeer zeldzaam in onze gewesten, zijn meestal slechts in de rechtstreekse nabijheid van de eigenlijke haard met gerucht begeleid. Men hoort schokken, ratelen, kanongeluiden.

Aardbevingen[1)] komen nu en dan in ons land voor, maar zijn bijna nooit zo sterk dat er geluid bij gehoord wordt; in rotsige streken schijnt het geluid meestal veel sterker te zijn dan in alluviale gebieden. Men beschrijft het geluid als zeer diep, nauwelijks meer hoorbaar doch eer voelbaar, voor een zeker procent der mensen ligt het beneden de onderste gehoorgrens. Meestal schijnt het geluid even vóór de schok waargenomen te worden, maar de grote geluidssterkte en de sterke schokken vallen samen. De snelheid van de golven is veel groter in de aarde dan in de lucht, wanneer het geluid dus naar de lucht overgaat, moet het door de breking bijna loodrecht uittreden; inderdaad krijgt men ook sterk de indruk dat men het geluid van uit de diepte hoort komen.

39. Meteoorknallen.

Bij het neerkomen van een meteoorsteen hoort men meestal een knal, die 5 tot 10 sekunden duren kan; daarna komt een knetteren en bruisen gedurende verscheiden minuten, ongeveer als het geruis van een automobiel of vliegtuig.

Die knal is niet te wijten aan een ontploffing, want dikwijls vindt men daarna de meteoorsteen terug en kan men nagaan dat hij volstrekt niet uiteengespat is. De verklaring is, dat de steen met *meer* dan geluidssnelheid in onze dampkring komt en een knalgolf vóór zich samenperst, tot hij zo sterk geremd is, dat zijn snelheid kleiner dan de geluidssnelheid is geworden. Op dat ogenblik loopt de samenpersingsgolf met normale geluidssnelheid verder, zich van de steen losmakend en hem vooruitsnellend. Inderdaad heeft men waargenomen dat het geluid altijd enkele seconden vóór de steen zelf de grond bereikt.

De knal ontstaat meestal op hoogten van 20 tot 35 Km; het geruis na de knal is natuurlijk afkomstig van de hogere delen der baan, uit de duur ervan berekent men dat de meteoorsteen op ongeveer 75 Km begon geluid te geven.

Niet verwarren met donder!

1) Ch. Davidson, Phil. Mag. **1**, 31, 1900.

40. De donder.[1]

De donder ontstaat door de luchtgolf die bij het doorgaan der elektrische lading ineens naar alle richtingen wordt uitgezonden; of die golf ontstaat door plotselinge verwarming, elektrostriktie, of chemische reactie, is niet goed te zeggen. Als de bliksem vlak bij ons inslaat, klinkt de donder als een *knal*; het is zeer waarschijnlijk dat hij zich evenals een ontploffingsgolf met een snelheid groter dan de geluidssnelheid voortplant. Telkens als hij door de grens dringt van luchtlagen van verschillende temperatuur en vochtigheid maken zich sekundaire golven van het front der knalgolf los en lopen terug; zo komt het, dat men soms de donder als 't ware van alle kanten tegelijk hoort, en moeilijk zou kunnen zeggen van welke richting zijn geluid komt (vgl. § 5).

Een van de eigenaardigste kenmerken van de donder is *het rollen* van het geluid. Waarnemers die een opstijging maakten in een luchtballon en door een onweer overvallen werden, weten ons te vertellen dat men in hogere luchtlagen het rollen bijna niet hoort. Naast de terugkaatsing door de wolken en de breking in luchtlagen van wisselende temperatuur en vochtigheid, moet dus de terugkaatsing door de aarde een belangrijke rol spelen. Dit wordt bevestigd door het feit dat de donder een geheel ander geluid maakt in de bergen dan in de vlakte. In vele gevallen hoort men, dat de sterkte van de donder eerst geleidelijk toeneemt, en slechts een kwart sekunde of langer na de inzet een maximum bereikt. Dit zijn altijd de ver verwijderde donderslagen, wat men ook dààraan merkt, dat hun intensiteit gering is. Hoe verder de donder van ons af is, hoe meer de plotselinge inzet vervormd en vervlakt is, hoe langer hij duurt en hoe uitgesprokener het rollen is.

Dat alleen is reeds een afdoende weerlegging van de bewering, dat de lange duur van de donder toe te schrijven zou zijn aan de verschillende afstand van de onderscheiden punten der bliksembaan tot ons oor: want hoe verder de bliksem van ons verwijderd is, hoe geringer dit wegverschil. Er zijn gevallen bekend waarin het rollen na één enkele blikseminslag, in vlak land, tot 45 sekunden duurde![2]

De sterkste trillingen van de donder zijn zó langzaam, dat wij ze niet meer als geluid kunnen horen; ze trillen met een frequentie van ongeveer 5 trillingen per sekunde. Men merkt

1) W. Schmidt, Sitzungsber. Akad. Wien, **123**, 821, 1914.
2) Arago, Oeuvres, **4**, 81 (Le Tonnerre).

hun aanwezigheid aan het dreunen der vensterruiten en aan het trillen van de grond. In het geluidspektrum van de donder hebben zij de grootste intensiteit. Ook de iets snellere trillingen tot 40 per sekunde zijn nog goed vertegenwoordigd; daarboven worden de trillingen steeds zwakker, en boven de A van 120 trillingen per sekunde ontbreken ze bijna geheel.

Eenvoudige inrichtingen om het geluid te *registreren* vindt men beschreven t.a. pl. en in Met. Zs. **31**, 487, 1914.

41. Mistpoeffers.[1)]

Vooral aan onze Vlaamse, maar ook langs onze Nederlandse kust, van Boulogne tot Groningen, hoort men soms doffe knallen in de verte, waarvan de oorsprong nog raadselachtig is. De vissers noemen ze 'mistpoeffers,' 'zeepoeffers,' zeedoffers,' 'mistbommen,' 'gonzen,' 'balken.' Dergelijke verschijnselen kent men in Schotland ('paperbags'), in Zuid-Italië en Sicilië ('marina'), aan de golf van Bengalen bij de monding van de Ganges ('barisal guns'), in O. Indië, Congo, Centraal Amerika. Matrozen beweren dat men over de gehele Noordzee knallen hoort, tot IJsland toe. Het is klaarblijkelijk een kust- of zeeverschijnsel, maar toch kan men het horen over gans de Vlaamse vlakte, enige honderden kilometers landinwaarts. Nergens is het zo duidelijk en veelvuldig als in onze gewesten, en het moest de taak zijn der Nederlandse natuurkundigen om het raadsel der mistpoeffers op te lossen!

Het geluid klinkt als *boem*, of *brroem*, en gaat vergezeld van een dreunen; sommigen beweren dat ze eerst gedurende een paar sekunden een soort vóórgeluid horen, dat dan in de korte, dreunende knal eindigt, waarbij men soms de deuren voelt trillen. Vooral bij sterke knallen *voelt* men een trilling in de borst. Dikwijls komen de knallen in onregelmatige groepjes; de tussenruimten zijn zeer ongelijk, soms een paar minuten, soms een half uur. Er zijn gevallen bekend dat men een paar uur lang gemiddeld drie knallen per minuut hoorde, en zelfs andere waarbij de knallen als een aanhoudend gebrom op elkaar volgden.

Onderscheid tegenover kanongeschut: onregelmatige tussenruimten, geleidelijk vertragen bij het einde van het verschijnsel.

1) Uitvoerige, zeer verspreide litteratuur: Ciel et Terre en Nat.: 1895 en volgende jaren. - E. van den Broek: Un Phénomene mystérieux de la Physique du Globe (Brussel 1895-96). - S. Günther, Sitz. Akad. München 31, 237, 1901. - W. Bleeker, Hemel en Dampkring, 30, 1, 1932.

Het meest hoort men hier de mistpoeffers in de zomer (maximum in Juli), tussen 10 en 16 uur, nooit 's nachts; haast altijd op mooie, warme dagen, bij hoge temperatuur en rustige, onbewolkte, windstille lucht of lichte nevel. Dagen van zeer goede algemene hoorbaarheid zijn ook gunstig voor de waarneming. In Vlaanderen schijnt men ze op gemiddeld 1 van de 20 zomerdagen waar te nemen. Als men aan 't strand is, schijnt het geluid van het Westen te komen; landinwaarts zijnde, vindt men het moeilijk een richting aan te geven. Merkwaardig vooral is, dat alle berichten ongeveer *dezelfde sterkte* voor het geluid aangeven, dus niet des te sterker naarmate men zich dichter bij de geluidsbron bevindt.

Wat kan dat geheimzinnige verschijnsel zijn? Sommigen hebben gedacht aan het geluid van de branding; maar dat aan onze vlakke kust en hoorbaar op een afstand van honderden kilometers?? Of aan 'een luchtmassa die warmer dan haar omgeving is geworden en ineens opstijgt' (??). Of aan kleine aardbevingen of verschuivingen in de aardkorst. Het schijnt thans verreweg het waarschijnlijkst, dat in ruim de helft der gevallen de mistpoeffer eenvoudig een verre donder is; in de overige gevallen daarentegen de knal van verre kanonnen. In gevallen waarbij er geen onweer noch schietoefeningen in de buurt voorkwamen, denke men aan de abnormale hoorbaarheid op grote afstand.

Bij het waarnemen tekene men op: plaats, tijd, aantal, richting, weer, aard van het geluid en van de trilling. Was het te onderscheiden van kanon of donder? Als twee of meer waarnemers op enkele kilometers van elkaar eens beproefden op de sekunde nauwkeurig de ogenblikken der knallen te bepalen?!

42. Het gerucht van de trein.

Het lied der wielen heeft ons grote leed gesust zo menigmaal.
Wies Moens, Nocturne (Landing, 1923).

Het eigenaardige gedreun ontstaat, doordat de wielen telkens een stoot geven op het ogenblik dat ze van het ene stuk rail naar het andere overgaan. Als de waarnemer buiten de trein staat, wordt voor hem de rhythmus der stoten bepaald door de verdeling der wielen over elke wagen; bij elk der volgende wagens herhaalt zich die groep stoten. Voor de waarnemer die in de trein zit, wordt de periode bepaald door de lengte van een stuk rail; hij hoort het sterkst het wiel waar hij vlak bij staat, maar daarnaast ook alle naburige. Onderzoek de verdeling der wielen vóór u

vertrekt en tracht de waargenomen rhythmus te verklaren! Verandert die als u op verschillende punten van de wagon gaat luisteren?

Bemerk het onderscheid tussen de rhythmus van een goederentrein en van een sneltrein.



Rhytmus van een sneltrein, waargenomen buiten de trein.

In het gedreun kan men naar willekeur vrijwel elk melodietje horen. Onder de talloze tonen die in het treingerucht gemengd voorkomen, worden sommige duidelijker en sterker hoorbaar, doordat wij er onze *aandacht* op vestigen.[1)]

De veranderingen in het gedruis die op bepaalde plaatsen van de baan altijd optreden, zijn soms te wijten aan ribbels in de spoorrails, soms aan weergalm van de omgeving. Is verandering bij dit punt van de baan ook hoorbaar als de trein op het andere spoor rijdt?

Als de trein gaat stoppen hoort men de eigenaardige knarstonen, die telkens optreden als twee voorwerpen over elkaar wrijven zonder smeermiddel; het zijn zgn. *relaxatietrillingen*[2)] (krijt over bord, kurk over glas).

43. Het gerucht van de elektrische tram.

> *Men hoorde in de nacht de chromatische toonladders der trams, met hun machtige crescendo's, die als 't ware met stoten schenen vooruit te gaan, en die uit hun stalen rail de toon van een reusachtige cello haalden.*
> *C. Yver, Le Festin des Autres, blz.* 37.

Een goed voorbeeld om te ontleden! Het bestaat uit:

1. het zoemen der motoren;
2. het ratelen der wielen;
3. het dreunen van de wagen bij de wissels;
4. het glijden van de beugel langs de draad;
5. het snerpen in de bochten;
6. het klinken van de bel.

1) Titchener, Experimental Psychology, I, 2, 193. - Stumpf, Tonpsychologie, blz. 292 (1890).
2) B. van den Pol, Natuurk. Voordrachten Diligentia, No. 8, 1930. - L'Onde Electrique, **9**, 293, 1930.

Hoe sneller de tram rijdt, hoe hoger het geluid der motoren (§ 1). In de wentelende delen zijn er altijd enkele die een voldoende aantal periodes per sekunde geven om een goed hoorbare toon te veroorzaken. De geluidsoorzaak nr. 5 behoort weer tot het type der relaxatietrillingen (§ 42), en schijnt de oorzaak te zijn van de 'spoorribbels', die zich hier en daar in de rails vormen.

44. De geluiden van een vliegtuig.[1)]

Het geluid ontstaat vooral door de motor en door de schroef.

Veel gebruikt worden motoren met 1440 omw/min. = 24 omw./sec. Een 6-cylindermotor geeft 3 ontploffingen per omwenteling; een 9-cylinder, 4,5. Er moeten dus tonen ontstaan van 72 of 108 trillingen per sekunde, met hun boventonen. Modernere motoren hebben 2000 tot 3000 omw./min. en dikwijls 12 cylinders.

Het geluid van de schroef heeft een trillingsgetal = aantal omwentelingen × aantal schroefvleugels. Dikwijls is het trillingsgetal 48 (moeilijk hoorbaar) of 96, met de daarbij behorende boventonen.

Zeer opvallend is, dat het geluid veel sterker wordt als men zich toevallig in het vlak bevindt, waarin de schroefvleugels draaien. Hoort men het geronk van een vliegtuig snel aanzwellen en dan weer afnemen, dan kan men er bijna zeker van zijn dat dit vlak juist over ons heen is gegaan; herhaalt zich het aanzwellen, dan is het vliegtuig bezig bochten en lussen te beschrijven, zodat het telkens weer in de gunstigste stand komt. Bij een ver verwijderd vliegtuig schijnt deze regel dikwijls niet precies uit te komen: bedenk dan echter, dat de afstand best een paar kilometer kan bedragen, en dat het geluid daar 6 sekunden over doet! Vraag u dus af hoe de stand van het vliegtuig was, *enige sekunden vóór* het aanzwellen van het geluid.

De geluiden van het vliegtuig kunnen sterk gewijzigd worden door aanzienlijke Doppler-effekten; ze slaan soms snel om, veranderen in de bochten. De sterktewisselingen schijnen voor een gedeelte te wijten te zijn aan de van plaats tot plaats veranderlijke turbulentie van de dampkring.

Bij glijvlucht treedt een eigenaardig geruis op, dat men herkent als men in een auto zit waarvan het regendak is uitgespannen. Het klinkt als fss, f-ch, f-sj.

1) Waetzmann, Ztschr. techn. Phys. **2**, 166, 1921. - Devé, C.R. **174**, 1010, 1922. - A. Fage, Proc. R. Soc. **107**, 451, 1925. En op veel andere plaatsen.

Geheel afgezien van deze geluiden geeft het vliegtuig nog een interferentietoon, die te wijten is aan de terugkaatsing van zijn geruis door het aardoppervlak, en die onmiddellijk in het klankakkoord te onderscheiden is doordat hij in hoogte stijgt, zodra we ons bukken, terwijl al de andere tonen daarbij gelijk blijven (vgl. § 35).

45. Automobielgeluiden.

Door het ineengrijpen der tanden in de versnellingsbak hoort men altijd een zacht gezoem: telkens als er twee tanden ineengrijpen is er een kleine

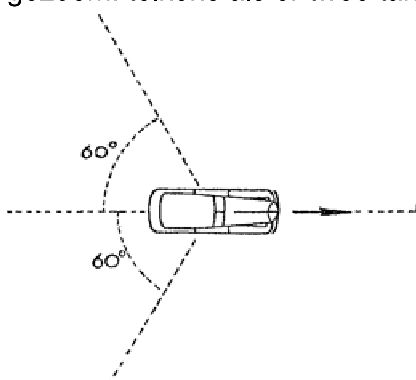


Fig. 17. Asymmetrische verdeling van het snerpende geluid om een rijdende auto.

stoot, en die stoot herhaalt zich honderden malen in de sekunde. Het sterkste geluid echter zal wel dat zijn van de motor, die een tiental omwentelingen per sekunde maakt, dus bij een 4-of 6-cylinder-type, een zware toon van 40 of 60 trillingen per sekunde geeft.

Een merkwaardig snerpend geluid kan men dikwijls horen, wanneer een auto voorbijrijdt waarvan de banden met schijfjes of figuurtjes bezet zijn, op een straatweg die geasfalteerd of met hout bedekt is. Zodra het asfalt in klinkerweg overgaat, verdwijnt het geluid bijna geheel, en evenmin is het te horen op een weg die met as of poreus materiaal bedekt is; daarentegen is het bijzonder luid als het wegdek nat is. Het ligt voor de hand dat de gummiblokjes zich vastzuigen en daarna een voor een met een knalletje losgerukt worden. Als de auto 12 m per sekunde aflegt, en de blokjes zijn 2 cm van elkaar, is het trillingsgetal 1200/2 = 600; inderdaad is de toon meestal vrij hoog. Maar het eigenaardigste en meest karakteristieke is *de asymmetrische verdeling* van dit geluid: vóór de auto is er zo goed als niets van te horen; op het ogenblik dat hij ons voorbijrijdt verschijnt het snerpend

geluid ineens in volle sterkte. men hoort de scherpe, zingende toon nog als hij al ver weg is.

Bij nauwkeurige waarneming bevindt men dat de sterke hoorbaarheid niet precies begint als men zich ten opzichte van de auto 'dwars' bevindt, maar even later; zodat de lijn auto-waarnemer een hoek van 20° tot 40° met de normaal maakt (fig. 17). Deze asymmetrische verdeling wordt begrijpelijk, indien het geluid ontstaat op het ogenblik dat een samengeperst blokje onder aan de band zich naar de achterzijde van het wiel verplaatst en daar weer los komt.

Naar mijn ervaring is dit geluid bij gunstige omstandigheden aan gemiddeld ⅓ der auto's in mindere of meerdere mate waar te nemen.

Al deze geluiden dalen en stijgen naarmate de auto langzamer of sneller rijdt, en vertonen het verschijnsel van Doppler.

46. Zingen van wagens.[1)]

Bij strenge vorst (-12° tot -15°C) schijnen de ijzeren veren en assen der wagens op straat soms een hoog trillend geluid te geven. Dit 'zingen' hoort men tot op grote afstand.

47. Het knallen van de zweep.[2)]
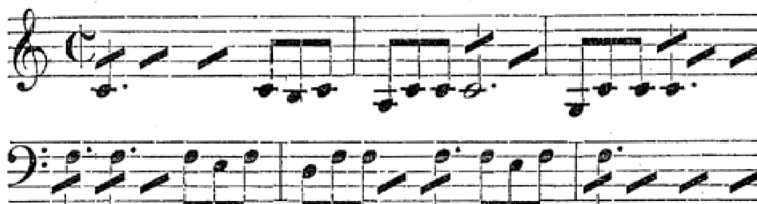
De *knal* van een meteoorsteen of van een kanonkogel ontstaat, doordat deze projektielen *met groter snelheid dan de geluidssnelheid* bewegen. Nu is het merkwaardige, dat ook het knallen van een gewone zweep tot precies dezelfde oorzaak terug te brengen is. Kinematografische opnamen hebben bewezen dat de top van de zweep gedurende een heel korte tijd met meer dan geluidssnelheid beweegt!

Nog veel huiselijker kan men de proef nemen: grijp een vierkantszijde van een natte handdoek aan de hoeken beet, en sla hem uit; daarbij moet men door een snelle polsbeweging een golf uitzenden die langs het doek voortloopt, en onmiddellijk daarna het doek achteruit rukken. Door deze echte zweepbeweging krijgt men eveneens een knal; en de hoge snelheid die het uiteinde van de handdoek bereikt wordt bewezen door de waterdruppeltjes die naar alle kanten wegspatten.

Denk aan het kloppen van dekens en raadpleeg de huismoeders!

1) Stricker, Ann. d. Phys. **121**, 335, 1864.
2) Z. Carrière, Journ. de Phys. **8**, 365, 1927.

48. Het geruis van het water.



Hoe voller de beek, hoe dieper de toon.
L.v. Beethoven, Schetsboek uit het jaar 1808; *eerste ontwerp voor het andante der Herderssymfonie.*
(G. Nottebohm, Zweite Beethoveniana, blz. 375; *Leipzig*, 1887).

De druppel die van de kraan valt maakt in het water daaronder een mooi geluidje; een ogenblik daarna ziet men een luchtbelletje dat boven komt drijven en uiteenbarst. De druppel heeft dus een weinig lucht meegesleept; het geluid wordt gehoord op het ogenblik dat het water zich om die luchtholte sluit, en *niet* bij het openbarsten van het aldus gevormde belletje. Dat geluid ontstaat, doordat de luchtholte *pulseert*[1)]: afwisselend wordt ze iets kleiner of groter, terwijl de lucht de rol speelt van het veerkrachtige lichaam en het omringende water de rol der trillende massa. Het aantal trillingen per sekunde van een belletje met straal r cm, is dan N = 328/r.

Grotere hoeveelheden meegesleepte lucht schijnen ook geluid te kunnen geven op de wijze van een gewone gesloten bolresonator of orgelpijp: van de holte die zich in het wateroppervlak heeft gevormd trilt dan alleen de luchtinhoud, terwijl de wanden als vast te beschouwen zijn.[2)] De frequentie is dan van de orde 1000/r, zodat klaarblijkelijk de luchtholten al vrij groot moeten zijn om op die wijze een goed hoorbaar geluid van gemiddelde toonhoogte te geven.

Uit een samenstel van dergelijke elementaire geluiden ontstaat

1) M. Minnaert, Phil. Mag. **16**, 235, 1933.
2) W. Bragg, The World of Sound, blz. 71 (London, 1921).

het gemurmel van het beekje, het gedreun van de waterval, het geruis van de zee.

Het geruis van de zee is voor het oor zeer moeilijk te ontleden; men slaagt er het best in, door zich aan 't strand dicht bij de zee te begeven, en dan het oor afwisselend dicht bij de grond en weer op normale hoogte te houden. Uit dergelijke waarnemingen kom ik tot het besluit, dat men te maken heeft met twee groepen tonen: 1. een diep geraas als van een daverend voorbijrijdende trein; 2. een hoger geluid, ruisend, klaterend. Als men zich bukt, wordt (1) versterkt, (2) stijgt aanzienlijk in toonhoogte en wordt eer zwakker. Neemt men dezelfde proef op een 50 m afstand van de zee, dan is geluid (1) in sterkte achteruitgegaan tegenover (2), maar overigens zijn de verschijnselen ongeveer dezelfde.

Het is duidelijk, dat de verandering van toonhoogte bij het bukken niets anders is dan het gevolg van de interferentie tussen het rechtstreekse en het door het strand teruggekaatste gebruis van de golven (§35). De oorsprong van het diepe geluid (1) is voorlopig onbekend; maar het is merkwaardig, dat een dergelijke onderscheiding in twee geluidsgroepen reeds lang geleden door andere natuuronderzoekers gemaakt was, wier werk mij niet meer voor de geest stond op het ogenblik mijner waarnemingen. Dit onderzoek zal ik thans beschrijven.

De uitstekende Zwitserse geoloog en natuurminnaar A. Heim, in samenwerking met zijn broer, den toonkunstenaar E. Heim, liet door musici aangeven welke tonen ze konden onderscheiden in het gedruis van een aantal watervallen en stortbeken. Eenparig werd aangegeven:

1. een diepe F, zeer sterk;
2. het akkoord C, E, G, waarvan de eerste toon duidelijk, de tweede zeer zwak, de derde zwak gehoord werden.

De diepe F was nog te horen achter een hoek of een bos, terwijl de hogere geruisen dan verdwenen. Bij geringe waterafvoer hoorde men de tonen een of twee oktaven hoger, bij grote waterafvoer soms in verscheiden oktaven tegelijk. E. Heim beweert, dat men lelijke dissonanten hoort, als men bij een ruisende rivier een lied beproeft te zingen in een andere toonaard dan die van C.

Ik kan voorlopig deze waarnemingen niet verklaren, en ben

[1]

1) Dingl. Journ. **214**, 344, 1874. - Günther, Sitzungsber. Akad. München, **31**, 230, 1901.

geneigd ze aan een muziek-psychologische reden, meer dan aan een natuurkundig verschijnsel toe te schrijven. Maar het resultaat dat door Heim verkregen is moet zonder twijfel een kern van waarheid inhouden en mag in geen geval vergeten worden. Als motto voor deze paragraaf vindt men de wijze waarop Beethoven het gemurmel van de beek genoteerd heeft, - naar mijn gevoel buitengewoon juist en nauwkeurig. En ziet! De twee tonen die hij er in hoofdzaak in hoort zijn: een diepe F en een hogere C!!

Aan kleine kinderen, 's zomers aan zee, wordt soms verteld dat de gloeiende zon sist als ze 's avonds in het water ondergaat. Ze luisteren, en dikwijls menen ze dit geluid te horen in 't geruis van de branding.

O regen met je dubbel geluid,
Geplas dichtbij en rondom geruis!
Coleridge, An Ode to the Rain.

49. Zwieptonen.

Houd een stok in het water van een stromend riviertje; geregeld snoeren zich wervels af, om de beurt aan de rechter- en aan de linkerzijde (fig. 18). Het gehele patroon noemen we: *de wervelweg van Von Kármàn*. De verhouding van de afstand *a* tussen

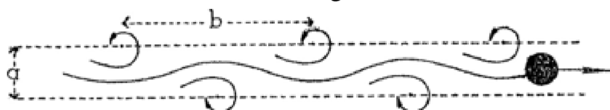


Fig. 18. Een stok wordt in een stromende beek gehouden. Er ontwikkelt zich een *wervelweg van Von Kármàn*.

de twee rijen tot de afstand *b* tussen twee opeenvolgende wervels is theoretisch berekend op 0,28, en experimenteel in overeenstemming daarmee bevonden.

Deze wervels werken ook terug op de stok. Beproef hem rechtlijnig door het water te bewegen, aan de oever staande of van uit een boot: het lukt niet, hij gaat *een slingerlijn* beschrijven zoals de slingerlijn van fig. 18. U kunt hem niet zo vast houden dat hij zich in een rechte baan beweegt!

Op dergelijke wijze snoeren zich luchtwervels af achter een

vlaggestok; U ziet ze als golvingen voortlopen langs de vlag, die ook de vorm van een slingerlijn aanneemt. Ze brengen de vlaggestok aan het trillen, zoals u voelen kunt door er de hand op te leggen; en die trilling geschiedt *dwars op de wind*. De afstand *a* is iets groter dan de dikte van de vlaggestok; twee golfdalen of twee golfbergen van de vlag moeten elkaar dus volgen op een afstand van ruw 5 maal de dikte van de vlaggestok. Komt dat uit? - Men zou eens het wapperen moeten onderzoeken van de vlaggetjes die vóór aan een auto zo lustig klapperen: hoe hangt de frequentie af van de dikte van de vlaggestok of van de snelheid van de auto's?

Een hengelsnoer dat bezwaard is, de ankerketting van een vastgeankerde boot, gaan aan het trillen zodra de stroming sterk genoeg is en wel dwars op de stroom. Is het aantal trillingen per sekunde voldoende groot, dan ontstaat geluid. Dit zijn de *zwieptonen* van de stormwind die tegen takken, touwen, draden blaast. Het trillingsgetal is gegeven door het aantal wervelparen dat zich per sekunde afsnoert: $N = 0{,}19\ V/d$: wil men dus bij geringe windsnelheid V nog een hoorbare toon krijgen, dan moet de middellijn *d* van de draad niet te groot zijn. - Houd bij uw oor een lange, fijne grashalm van het soort dat in heidestreken zo algemeen voorkomt (‘pijpestrootjes’ = Molinia Caerulea): reeds bij zwakke wind hoort u duidelijke hoge fluittonen. Als u tussen het hoge gras ligt, fluisteren de windgeluiden om u heen.

Soms kan de zwieptoon overeenstemmen met een der *eigen trillingen* van de draad: het geluid wordt dan aanzienlijk versterkt door de resonantie. Dit is het geval bij de aeolsharp en de zingende telegraafdraden.

50. Geluiden van de wind.

Ga met mij mee; het is een winteravond, donkere wolken trekken over de maan. Kom in het vrije veld!

1. De wind gonst in onze oren; er ontstaan wrijvingstonen aan alle ribben en vooruitstekende kanten van de oorschelp, de lucht in de gehoorgang gaat aan het trillen. We draaien ons hoofd zó dat één oor beschermd is, en houden de hand voor het andere. Nu pas kunnen we de natuurgeluiden ongestoord waarnemen.
2. In de draden der elektrische leiding maakt hij een zuivere

muzikale toon, een echte zwieptoon, waarvan we het trillingsgetal op N = 250 schatten. Pas de formule toe: $N = 0,19\ V/d$ die uit § 49 begrijpelijk is; met de draaddikte $d = 0,5$ cm bijvoorbeeld wordt de windsnelheid V = 660 cm/sec. Dat is niet onwaarschijnlijk.

3. De wind loeit als hij langs boomstammen, takken, twijgen blaast. Blijkbaar zijn dit ook zwieptonen, want hoe sneller de wind, hoe hoger de toon; iedere windstoot doet de toonhoogte sterk stijgen.[1]
4. Hoge geruistonen horen we in dennebomen (naalden), in beukebomen (dorre bladeren), in esdoorns

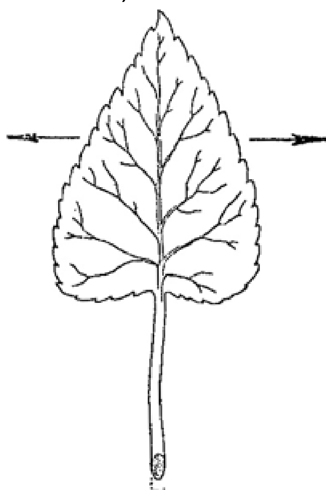


Fig. 19. Het trillende populierenblad.

(droge vruchtjes). Zij ontstaan als deze verschillende plantendelen tegen elkaar stoten.

Bijzonder sterk is het ruisen der populieren. Bekijk de bladsteel van een populierenblad: hij is *afgeplat*, en wel juist in de richting die het trillen van het blad het meest begunstigt. Fig. 19 stelt een blad voor in het vlak van tekening; als de wind loodrecht op het papier blaast, schommelt het blad dwars op de wind in zijn eigen vlak, zoals de pijlen het aangeven (§ 49). Men ziet nu hoe de afplatting van de bladsteel, door de vorm van de doorsnede aangeduid, deze beweging begunstigt.

In de zomer oefene men zich, aan het ruisen van de wind te onderscheiden langs welke bomen men wandelt.[2] Het geruis van dennenaalden is hoog maar zacht, een beukebos daarentegen maakt veel geluid doordat de blaren zo breed zijn. In elk jaargetijde is het geruis van een boom weer verschillend. Als het regent, hoort men de nabijheid van elke struik door het ruisen der druppels tegen de bladeren; in een beukebos is dat een echt lawaai.

Bij felle wind heb ik (in April) tussen de dorre rietstengels een merkwaardig ratelend geluid waargenomen, nu hier, dan daar,

1) Over het geruis van het woud, zie W.J. Humphreys, Journ. Wash. Acad. **13**, 49, 1921.
2) Vgl. de nouvelle van S. Farina: Fra le corde di un Contrabasso.

alsof iemand telkens 'rrr ....' zei. Wellicht ontstaat het, doordat twee naburige halmen in de windstroom naar elkaar toe getrokken worden, volgens een bekende hydrodynamische wet; even later raken ze, de stroom wordt niet meer doorgelaten, ze komen weer los, enz. (§ 52).

O 't ruischen van het ranke riet!
o wist ik toch uw droevig lied!
wanneer de wind voorbij u voert
en buigend uwe halmen roert.

G. Gezelle, Dichtoefeningen.

Als ge naar het kooren luistert,
dat nu op- nu nedergaat;
daar een zwepe wind in snuistert,
dat de lieve zonne baadt.

G. Gezelle, Tijdkrans.

51. Het zingen van telegraafdraden.[1)]

Dit verschijnsel lijkt zo grillig, en de waarnemingen die er betrekking op hebben zijn zo merkwaardig, dat we goed zullen doen de verklaring voorop te stellen, waartoe men na lang zoeken gekomen is: de voorbijwaaiende wind veroorzaakt een zwieptoon (§ 49 en 50), en die wordt versterkt als hij min of meer samenvalt met een der harmonische boventonen van de draad (dus met een 'eigen trilling'). De draad trilt dus *dwars* op de wind. Alle omstandigheden die invloed hebben op windsnelheid, diameter of eigen trillingstijd van de draad, hebben ook invloed op het zingen; vandaar dat het verschijnsel zeer grillig lijkt en dat er zo veel en verward over geschreven is. Verder moet nog bedacht worden, dat het geluid zich bij vorst aan de harde aarde in de nabijheid van de paal meedeelt, zodat het geluid als door een klankbord versterkt wordt; is de aarde niet bevroren, dan is de demping in de weke aarde te sterk.

Het geluid is het duidelijkst, als men zijn oor tegen de paal legt. Men hoort tegelijk de tonen van *twee* groepen draden: die vóór en die achter de paal. Aan de volgende paal hoort men dus weer een nieuw accoord; wie muzikaal geoefend is, kan een lijstje van die tonen opmaken, en zoeken welke daarvan aan twee palen gemeen zijn: die zijn afkomstig van de daartussen hangende draden. Dikwijls hoort men dissonanten en zwevingen, vooral daar waar er verscheiden draden samenkomen. Eenzelfde draad

1) Das Wetter, **21**, 185, 1904; **29**, 69, 1912; **33**, 70, 1916; en de verder aangehaalde plaatsen.

kan diepe tonen geven, en enige uren later veel hogere; blijkbaar zijn er dus sommige omstandigheden veranderd, waardoor nu andere boventonen dan daareven tot meetrillen worden gebracht. De tonen verspringen soms vrij plotseling.

Telegraaf- en telefoonleidingen trillen op verschillende wijze, want ze zijn verschillend van dikte. Nu eens zingt de ene groep meer, dan de andere.

Sommige palen zingen bijna altijd, andere nooit. De richting van de wind ten opzichte van de draad is natuurlijk van invloed. Bepaalde waarnemers beweren dat de wind *gelijkmatig* moet waaien en dat windstoten niets tot de trilling bijdragen. Er zijn gevallen waarin de draden sterk zongen terwijl de lucht bijna bladstil was,[1)] maar daar hoeft men zich niet over te verwonderen, als men bedenkt hoezeer een toevallige goede resonantie de amplitude der beweging kan versterken. Verder zijn er leidingen, die alleen kort na zonsopgang of na zonsondergang gedurende enige tijd aan het zingen gaan, en dat vooral bij bepaalde windrichtingen of bij wolkenloze dagen[2)]. Onwillekeurig moet men denken aan de beroemde Memnonszuil in Egypte! Hier evenals daar moeten sterke temperatuurveranderingen de hoofdrol spelen.

Soms trillen strak gespannen draden zo heftig, dat men de golvingen duidelijk met het oog kan zien; terwijl los doorhangende draden dit veel minder doen[3)]. Bij dit soort trillen ontstaat geen toon, daar de trillingen te langzaam zijn; wellicht zijn het de gevallen waarin de draden hun grondtoon of eerste boventoon geven. Men heeft dit zichtbare trillen ook bij windstil weder waargenomen, en op dagen dat de draden dik met rijp bedekt waren; dit is volmaakt begrijpelijk, aangezien een geringe windsnelheid en extra-belasting van de draad de periode van de zwieptoon zeer langzaam maken.

Er zijn waarnemers, die beweren, dat het zingen der draden verandering van luchtdruk aankondigt en het omslaan van het weer, en des te sneller omslag naarmate de tonen hoger zijn. Het spreekt vanzelf dat dit een zeer oppervlakkige waarneming is; wat de draden doen, wordt alleen door de *nu* heersende toestand bepaalt. Een gegeven draad zal bijvoorbeeld zingen omdat er een sterke ZW-wind waait (of door een dergelijke oorzaak); en aangezien sterke ZW-wind dikwijls de aankondiging kan zijnvan naderend slecht weer, zal het zingen van de draad meermalen

1) Chr. Nell, Hemel en Dampkring, **1**, 255, 1917.
2) Das Wetter, **30**, 116, 1913; **33**, 263, 1916.
3) Das Wetter, **35**, 132, 1918; **44**, 70, 1927.

door slecht weer gevolgd worden. Er zijn echter zoveel andere storende faktoren, dat men geen voorspelling op dergelijke gronden steunen kan.

Onder de zeelui vertelt men sinds lange tijd, dat het zingen van de wind in het touwwerk en het fluiten van de blokken naderende storm uit ZW aankondigt.[1)] Het schijnt dat de toenemende vochtigheid de touwen spant en daardoor hun eigen trilling in een gebied brengt dat gunstiger is voor het ontstaan van het geluid.

De kinderen denken dat het zingen der telegraafdraden veroorzaakt wordt door telegrammen die langs de lijn verzonden worden! De spechten menen dat er wormen in de palen verborgen zitten en hakken er op los.[2)]

52. Het touw aan de vlaggestok.

Vrolijk klepperen in de zeewind de touwen die langs de vlaggestok gespannen zijn. - We zijn op 't strand, of aan de achtersteven van een varend schip. Het is merkwaardig hoe regelmatig het klepperen is, terwijl toch de wind nu sterker, dan zwakker waait; blijkbaar hangt de trillingstijd niet van de windsnelheid af. Maak de touwen onder los, en houd ze verder van de mast: ze klepperen niet meer. Om het verschijnsel in zijn eenvoudigste vorm te onderzoeken, naderen we het ondereind van slechts één der touwen tot de mast; zodra de afstand minder dan een 15 cm geworden is, begint het klepperen weer. Trekken we iets sterker aan het touw, dan kleppert het sneller. Nemen we de twee touwen samen, en beproeven even sterk te trekken als bij één touw alleen, dan is de beweging langzamer.

De trilling is dus wel een *eigen trilling* van het touw, en de trillingstijd hangt af van spanning en dikte. Het zou wel eens kunnen zijn, dat het touw eenvoudig trilde als een gespannen snaar die haar grondtoon geeft! Een touw waarvan wij de lengte schatten op 6 m, de dikte op 7 mm, de massa van 1 cm op 0,3 gr, gaf ongeveer 4 trillingen per sekunde, als men er aan trok met een kracht van 5 kg[3)]. Volgens de snaarformule (§ 10, 11) is de trillingstijd:

$$T = 2 \times 600 \sqrt{\frac{0,3}{5000 \times 981}} = 0,3 \text{ sec.}$$

1) J.H. IJmker, Hemel en Dampkring, **1**, 94, 1903.
2) Das Wetter, **28**, 284, 1911.
3) Gemeten met een veerbalansje; prijs f 0,30.

De overeenstemming met onze waargenomen periode van 0,25 sec is heel goed, daar alle grootheden alleen op schatting berustten (en heus niet achteraf aangepast zijn!)

Maar hiermee is het vraagstuk nog niet geheel opgelost. We zouden nog willen te weten komen *hoe het touw aan het trillen gebracht wordt*. Het was wel opvallend dat het niet veel minder dan 3 en niet veel meer dan 6 trillingen per sekunde kon uitvoeren, hoe men ook de spanning wijzigde. Blijkbaar heeft het mechanisme dat de trilling opwekt ook zijn eigen frequentiegebied, en alleen als de frequentie van het touw hier niet teveel van afwijkt kan de trilling een behoorlijke amplitude bereiken, precies zoals de eigen toon ener orgelpijp ongeveer in het frequentiegebied van de tong moet vallen, wil de pijp aan het trillen gebracht worden. Het feit dat een touw niet kleppert als men het ver van de mast houdt, bewijst dat de trilling niet ontstaat op de wijze van de zwieptonen der zingende telegraafdraden. Zijn het dan misschien zwieptonen die zich vormen aan de vlaggestok (§ 49)? Dan moest het aantal trillingen per sekunde gegeven zijn door N = 0,19 windsnelheid / dikte van de stok' heir ongeveer

$$\frac{0{,}19 \times 1100}{9} = 23$$

. Dat komt niet uit!

Waarschijnlijk ontstaan de trillingen in dit geval heel anders. Touw en vlaggestok, naast elkaar in een luchtstroom geplaatst, worden hydrodynamisch naar elkaar toe gezogen. Ontmoeten ze elkaar, dan houdt de luchtstroom op, dus ook de aantrekking, en het touw verwijdert zich elastisch van de stok; daarna begint het spel opnieuw. Wie berekent de periode van dit verschijnsel?

53. De koekoeksroep.[1)]

Een mooie oefening in het bepalen van absolute toonhoogten en intervallen! Meestal is het interval een terts, tussen een grote en een kleine terts in: de 'koekoeksterts.' Zeldzaam zijn kwarten (f c) of sekunden (d c), zeer zelden komt de kleine kwint voor (ges c). Er zijn enkele gevallen bekend waarin de koekoeksroep uit *drie* tonen bestond: f"ges"des", ges"ges"des", f"d"h'; ook de drieklank g"e"c" komt voor.

Na een lange rust zijn de eerste intervallen dikwijls iets te klein, daarna stijgt de bovenste der twee tonen weer en wordt het interval het gewone.

Absolute hoogte: meest e"c"; grenzen: ges"h'.

1) v. Oppel, Ann. d. Phys. **144**, 307, 1872.

54. Geluiden van insekten.

Meestal is de toonhoogte bepaald door het aantal vleugelslagen per sekunde. Soms ziet men een vlieg in de zonneschijn als een stippellijntje: de vleugels kaatsen het zonlicht sterker terug als ze in een bepaalde stand staan, en die stand komt bij elke vleugelslag éénmaal voor. Schat de afstand *a* van twee opeenvolgende stipjes en de snelheid *v*, dan is *v/a* het aantal trillingen per sekunde. Dit moet kloppen met de toonhoogte van 't gegons.

Een grote stenen kan staat op de tafel, ledig. Daar komt een wesp gonzend aan, vliegt erin: ineens wordt haar geluid zeer versterkt. Zodra de wesp weer weg is, blazen we lichtjes over de monding van de kan, en horen precies dezelfde bromtoon. 't Was een eigenaardig geval van resonantie!

Een veldsprinkhaan maakt geluid, door met zijn ruwe achterdij over de lederachtige dekvleugels te schuren. Bij de groene sprinkhaan en de krekel is het de éne dekvleugel die over de andere wrijft, terwijl beide geribbeld zijn. De tonen zijn meestal zeer hoog. In een gezelschap zijn er altijd sommige mensen, vooral oudere, die een krekel niet horen terwijl de andere hem duidelijk waarnemen; blijkbaar is voor hen de gehoorgrens overschreden.

> Bepaal de toonhoogte van het gegons van verschillende insecten, die nauwkeurig gedetermineerd moeten worden.

55. Tonen van bakstenen.

Houd een baksteen los tussen twee vingers in het midden zijner lengte en sla hem aan met de knop van een wandelstok: hij geeft een duidelijke toon. Een klinker van ongeveer dezelfde grootte geeft een toon die bijna een oktaaf hoger is. Dit verschil is te wijten aan de veel grotere elasticiteitsmodulus van de klinker.

De laagste toon van de baksteen is die welke overeenkomt met longitudinale golven in de richting van zijn grootste afmeting *l*; het trillingsgetal is gegeven (zoals dat van een open orgelpijp) door de formule:

$$N = \frac{\text{geluidssnelheid in baksteen}}{2l}$$

. Op deze wijze vond Chladni, dat de geluidssnelheid in baksteen 10 tot 12 maal die in lucht bedraagt.[1)]

1) Akustik, § 216.

56. Zingend zand.[1)]

Als men een losse duinhelling bestijgt, of op bepaalde delen van het zeestrand loopt, hoort men bijna altijd een zacht geruis van het wegglijdende zand. Er zijn nu enkele zeer bepaalde plaatsen waar dat geluid veel sterker wordt en overgaat in een knarsen, krijsen. Om dit goed te kunnen horen moet men met de voeten door het zand *schuiven* of sloffen; of er in *schuine* richting op trappen, of er een flinke wandelstok door slepen. Het geluid heeft natuurlijk geen zuiver bepaalde toonshoogte, maar is toch duidelijk hoger naarmate de zandkorrels fijner zijn, en naarmate ze sneller over elkaar schuiven. In een bepaald geval kwam de toon ongeveer overeen met a = 217 trillingen per sekunde wanneer men op het zand trapte, fis^2 = 732 wanneer men er met de vingerknokkel in roerde, a^3 = 1740 als men er een stok door haalde.

Zulk muzikaal zand vindt men op allerlei plaatsen over de hele wereld, op Bornholm, aan de Schotse, Engelse en Baltische kusten, en ook hier en daar aan het Nederlandse strand.

Ik heb het in Noordwijk bij ebbe prachtig waargenomen, maar alleen in de uiterste strook die nog door de zee bevochtigd was geworden toen het vloed was, en die nu al in de zon was gedroogd; de breedte van die strook was slechts ongeveer 5 meter, maar ze strekte zich uit *over de gehele lengte van het strand*, (uitgezonderd daar waar veel mensen hadden gelopen), ik kon niet vinden waar ze eindigde. Het was een rustige Meidag met weinig wind en weinig zon, er waren niet veel bezoekers, zodat het zand op grote gedeelten van het strand onaangeroerd was.

Een andere maal hoorde ik het zingende zand zwakjes nabij Zandvoort, zelfs op plaatsen waar veel gelopen was. Het verschijnsel zal stellig blijken veel algemener voor te komen dan men nu denkt, indien men er enige aandacht aan besteedt en op de hier opgesomde omstandigheden let: volgens de litteratuur gelden die vrij algemeen.

Vast staat, dat zingend zand zich onderscheidt door de gelijkmatige grootte van zijn korrels; zodra er stof of plaatjes van schelpen tussen voorkomen, verdwijnt het geluid. Meestal zijn de korrels mooi rond; soms geven ook zandsoorten met hoekige korrels

1) Nat. **39**, **77**, **81**; vooral **44**, 322, 1891. - S. Günther, Sitzungsber. Akad. München, 31, 5, 1901. - Een standaardwerk van H. Carrington-Bolton en A.A. Julien over het zand is aangekondigd in Nat. **38**, 515, 1888, maar voor zover mij bekend nooit verschenen. - De beste en uitvoerigste verhandeling met uitgebreide litteratuuropgave, is: P. Dahm, Schr. naturf. Ges. Dantzig **12**, 32, 1910.

geluid, maar dat verdwijnt spoedig omdat de ribben en hoeken afslijten, en er dus stof tussen de korrels komt, dat de gelijkmatigheid bederft. Het zingende zand is dus blijkbaar gesorteerd, zodat alleen korrels van vrijwel constante grootte overblijven. Dat de vindplaatsen juist voorkomen bij de hoog water-grens, bewijst mijns inziens dat die sorterende werking aan het water, en niet aan de wind is toe te schrijven.

Het is een bekend feit, dat de wind geen zandribbels vormt, tenzij waar de korrels van verschillende grootte gemengd voorkomen. Men zou dus verwachten, dat zingend zand geen ribbels vertoont. Inderdaad is het een feit, dat in vele gevallen het zingende zand zich door zijn oppervlak van het omgevende strand onderscheidt, maar de eis der gelijkmatige korrels schijnt niet zò streng te zijn dat alle ribbelvorming daardoor belet wordt. De ribbels die zich op zingend zand vormen onderscheiden zich door hun kleine golflengte (< 6 cm); in andere gevallen ontbreken ze geheel.

Het zingende zand van Schotland geeft ook nog geluid als men het naar huis meeneemt en ermee experimenteert. De allerbeste soorten piepen zodra men ze met een stamper wrijft; iets minder goede soorten piepen als men ze wrijft in een theekopje met hardgeglazuurde wanden; nog minder goede doen het slechts in geglazuurde vaten van bepaalde vorm, op een houten plankje geplaatst dat het geluid versterkt. Men kan de kwaliteit van het zingende zand verbeteren door het te zeven, door het in verdund zoutzuur te koken, door de korrels langs een hellende plaat matglas naar beneden te laten rollen om ze te scheiden van het stof en van de plaatjes. Gewoon zand schijnt echter door dergelijke middelen niet in zingend zand te kunnen omgezet worden. Sommige soorten krijgt men tijdelijk tot geluidgeven, maar weldra slijten de zachtere bestanddelen af, en wordt het geluid bedorven door het zich vormende stof. Het opzettelijk toevoegen van stof is natuurlijk ook voldoende om het geluid te doen ophouden.

Ik ben persoonlijk overtuigd, dat het geluid ontstaat doordat elke bepaalde zandkorrel langs een aantal andere glijdt, en er dus evenveel trillingen per sekunde ontstaan als hij er per sekunde aanraakt. Alleen als die trillingen *met min of meer gelijke tussenruimten* geschieden, hoort men een werkelijke *toon*; de meest kenmerkende bijzonderheid, de eis der even grote korrels, wordt aldus begrijpelijk; ook begrijpt men dat fijnere korrels hogere geluiden geven dan grove. Om een toon van 200 trillingen per sekunde te geven, zouden korrels van 0,4 mm middellijn met een

snelheid van 8 cm per sekunde over elkaar moeten schuiven: dit lijkt wel mogelijk.

De hier voorgestelde theorie verklaart ook, waarom het zingende zand juist in de uiterste strook voorkomt die bij vloed door de zee bevochtigd is geweest: daar heeft het zand zich afgezet uit weinig bewogen water, zodat de korrels min of meer in volgorde van hun grootte bezonken zijn, en even grote korrels in elkanders nabijheid voorkomen.

De andere verklaringen die men beproefd heeft zijn erg gezocht.

1. Men heeft zich voorgesteld dat het geluid te verklaren was op de wijze der relaxatietrillingen: de zandkorrels zouden een ogenblik aan elkaar hechten, dan van stand veranderen en opnieuw ineengrijpen, enz. (Vgl. het gepiep van krijt over 't bord, of van een slecht gesmeerd wagenwiel).
2. Anderen denken aan een soort wrijvingstoon van de lucht die uit de tussenruimten stroomt tegen de korrels.
3. Men heeft de zandkorrels als trillende staafjes willen opvatten, waarin zich staande trillingen ontwikkelen.
4. Of men heeft de resonantie der luchtholtetjes tussen de korrels ter hulp geroepen.
5. Tenslotte heeft men beweerd, dat alles aankomt op het zout, dat van het uitgedroogde zeewater afkomstig is, en een korst aan de oppervlakte heeft gevormd; als men voorzichtig de bovenste laag afschept daar waar het geluid het sterkste is, zou men het zoutgehalte rechtstreeks kunnen proeven. (En als men op andere plaatsen proeft?) Geen van deze theorieën houdt steek.

Daarentegen is er nog een laatste verklaring, die een iets uitvoeriger vermelding waard is, en de mijne wellicht aanvult: waar zandkorrels omgeven zijn door water, worden ze zo bewegelijk, dat ze zich vanzelf ‘in dichtste pakking’ rangschikken; iedere storing betekent dan dat de korrels aan alle kanten gaan verschuiven. Zodra de wind het zand opdrijft, is het niet meer in dichtste pakking en verdwijnt ook het geluid. Het verdwijnt ook door regen of door de vochtige zeewind, die een waterhuidje tussen de korrels brengen en aldus hun trillingen dempen; zwakke, droge landwind hindert niet. Het oppervlakkig gedroogde zand rust meestal op een nog vochtige en goed samenhangende ondergrond (1 tot 15 cm diepte); deze wordt geacht het geluid te versterken. Ook een bevroren onderlaag kan dezelfde rol vervullen.

In sommige gevallen vindt men dat het zand aan de oppervlakte een soort samenhangende korst vormt van wel 1 cm dikte; daar-

onder ligt los zand, dat insgelijks droog is; en het diepst ligt het nog vochtige zand. Wanneer men met een schop een kuiltje graaft, vormt zich het profiel van fig. 20. Zet men zijn voet op dergelijk zand, dan breekt men zonder merkbare tegenstand door de bovenste korst, en perst de losse zandmassa die er onder ligt opzij; deze wijkt uit, en heft een stuk van de oppervlakteplaat op (fig. 21). Dergelijke waarnemingen bewijzen hoe innig de samenhang is van de bovenste laag bij pas gedroogd zand, en maken begrijpelijk dat elke verschuiving zich aan een groot aantal korrels meedeelt.

In de woestijnen van Arabië, Afghanistan en de Sahara kan zich een dergelijk verschijnsel op grote schaal voordoen, vooral waar het zand op steile hellingen in labiel evenwicht ligt.[1] Het geluid schijnt dan veel dieper: een gebrom, een ver gedreun. Allerlei verhalen van ‘zingende bergen’ enz. zijn aan dit verschijnsel toe te schrijven; reeds de eerste reizigers die in de middeleeuwen door de zandvlakten

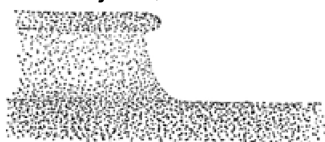


Fig. 20. Profiel van een kuiltje in oppervlakkig gedroogd zand.

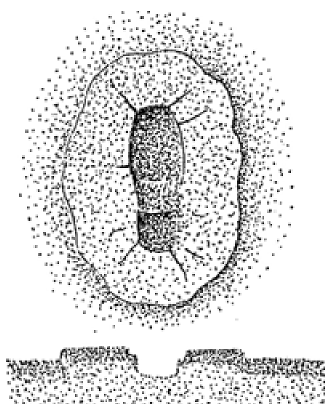


Fig. 21. Voetspoor in oppervlakkig gedroogd zand.

van Midden-Azië trokken, vertellen van de zonderlinge, trommelachtige geruchten die men er soms hoort.[2]

Ook hier is het de vraag of het nodig is dat het zand vooraf vochtig was; in een bepaald geval is het geluid alleen dàn sterk, wanneer het zand voldoende door de zon verwarmd is.

Het krakend, snerpend geluid van de sneeuw als het zeer

1) S. Günther, Sitz. Akad. München, **31**, 211, 1901.
2) Günther noemt hier de Vlaming Ruysbroek; hij verwart zonder twijfel met *Willem van Rubroek*, uit Frans-Vlaanderen, die in de 13e eeuw een grote tocht langs de Kaspische Zee en het Aralmeer maakte. Hoewel ik er het reisreisverhaal van Rubroek op nagekeken heb (uitgave Bergeron, 1735), kon ik geen vermelding van het verschijnsel vinden. Daarentegen uitvoerig bij Marco Polo.

koud is, is van hetzelfde karakter als dat van het zingende zand. En het is in hoge mate belangwekkend, dat in de poolstreken, waar de sneeuw in grote massa's en onder grote hellingen bijeengewaaid ligt, het geluid evenals bij zand in een trommeltoon overgaat.[1)]

57. Eigen geruis van het oor.

In de nacht, in de stilte van een spelonk horen we altijd nog een zwak geruis: het is veroorzaakt door de bloedsomloop in onze oren. Soms hoort men dit gesuis veel luider worden, zodat het ook bij dag goed waarneembaar is; het zet ineens in, duurt zelden langer dan 10 of 20 sec, wordt zwakker en verdwijnt. De toon ligt tussen d^1 en b^3 (bij mij: b^1 en c^2 = 480 tot 530 trillingen per sec. Elk der twee oren hoort een verschillend gesuis; koorts maakt het veel duidelijker.

Ziehier nu een van die berichten van reeds heel lang geleden, afkomstig van een uitstekend waarnemer, een bericht waarvan men aarzelt de juistheid aan te nemen, en dat men toch niet zonder meer durft verwerpen.[2)] Reuleaux kon gemakkelijk de gemiddelde toonhoogte bepalen van het geruis van een watermolen of van een rijdende trein. Daarnaast echter hoorde hij bij aandachtig luisteren een andere, zeer zwakke toon, waarvan de hoogte niet afhing van de geluidsbron, mooi en muzikaal klinkend als het fluitregister van een orgel: g^1. Deze toon kon hij naar willekeur in het ene of in het andere oor waarnemen, al naar gelang hij er zijn aandacht op concentreerde. De toonhoogte van deze ‘subjektieve toon’ kon hij enigszins veranderen, met enige oefening gelukte het, hem van *a* tot d^2 te variëren; deze veranderingen duurden echter ongeveer ½ sec. en veroorzaakten hem altijd een weinig spiervermoeienis.

Reuleaux stelt zich voor dat het trommelvlies (of een holte in het oor) een eigen trilling kan uitvoeren, waarvan de frequentie nog een weinig te wijzigen is door de spanning van sommige spieren; wellicht zijn dit de twee kleine spieren die aan de gehoorbeentjes aangrijpen.

58. Geluiden van onbekende oorsprong.

Telkens duiken hier en daar berichten op over zonderlinge geluiden waarvan men de oorsprong niet vinden kan. Soms zijn

1) S. Günther, t.a. pl. - Dauvillier, Nat, **133**, 836, 1934.
2) Vierteljahresschr. d. naturf. Ges. Zürich, **4**, 94, 1859.

het geluiden als van een lopende motor, ‘wind in de bergen,’ ‘een gegons in de lucht,’ ‘kloppen’ in de mijngangen, enz.[1)]

Dergelijke berichten zijn dikwijls toe te schrijven aan de verwarde en zonderlinge voorstellingen van mensen die niet natuurwetenschappelijk ontwikkeld zijn. Maar daar kunnen ook belangwekkende waarnemingen bij zijn, want het eenvoudige volk is meer vertrouwd met de natuur dan menig geleerde, en kan ons op het spoor brengen van nog onbekende verschijnselen. Onze taak moge het zijn, belangwekkende berichten ter plaatse te gaan kontroleren, en onbevooroordeeld de juiste oorzaak vast te stellen.

59. Landelijke muziekinstrumenten.

1. Zoek een blaadje van een of andere zachte grassoort, waarvan de randen niet omgekruld zijn. Klem het tussen uw twee duimen, zodat het de nauwe spleet tussen hen middendoor

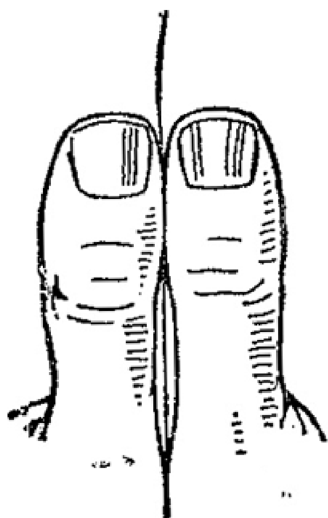


Fig. 22. Fluiten op een grasje.

deelt (fig. 22). Als u nu flink in de spleet blaast, uw lippen tegen de duimen gedrukt, geeft het grasje een hoog en luid gepiep. - Verklaring: zoals bij de zwieptonen vormen zich wervels, afwisselend rechts en links. Het grasje trilt dus dwars op de luchtstroom. Evenals een snaar heeft het een eigen toon, waarvan de frequentie afhangt van lengte, dikte, spanning. De windsnelheid moet daar enigszins bij aangepast zijn, zoals bij de zingende telegraafdraden en bij de meeste blaasinstrumenten, die haast altijd uit twee gekoppelde trillende stelsels bestaan. Door de spanning van het grasje te wijzigen kan men er een liedje op spelen.
2. Rietfluitje met dubbele tong. - Neem een korenhalm, snijd een stukje af tussen twee knopen, dus een buisje dat aan de twee kanten open is; druk nu het ene uiteinde samen tot de twee kanten opeen liggen. Als u dit fluitje tussen de lippen houdt en blaast, hoort u een piepende toon, maar waarvan de hoogte goed bepaald is. Het fluitje werkt dus op de wijze van het mondstuk van een hobo, doordat de twee randen afwisselend dichter en verder van elkaar komen (vgl. het touw aan de vlaggestok, § 52).

1) Houzeau: L'Etude de la Nature, blz. 57.

3. Zoek waar een es groeit, met zijn tegenoverstaande, gevederde bladeren, en snijd er een twijg af (fig. 23 *a*); of neem de twijg van een wilg, sering, vlier, lijsterbes, desnoods van linde

of hazelaar. Het best doet men dit spelletje in de lente (April, Mei), als de boom het meeste sap heeft. Snijd een ring van de schors weg (*b*), maak het twijgje in de mond nat, en klop aanhoudend met de rug van het mes op

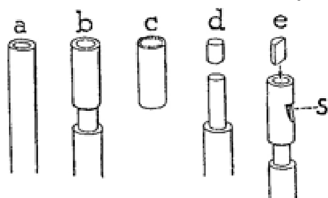


Fig. 23. Het vervaardigen van een fluitje.

het twijgje, dat op uw knie rust, tot de dunne bastlaag stuk gaat die tussen hout en schors zit; met een voorzichtig wringende beweging schuift men er het schorscylindertje af (*c*). Snijd een stukje af van het hout (*d*), maak dit aan één kant vlak (*e*), snijd een stukje *s* uit het schorscylindertje en zet het geheel in elkaar, volgens het figuurtje (*e*).[1)] - Dit fluitje werkt op de gewone wijze van een bekfluit: de bandvormige luchtstroom breekt tegen de scherpe kant *s* van de schorscylinder en vormt daar een zwieptoon.

Sap - sap - siepien
Wanneer bist du riepien?
Te Meie, te Meie,
Als de veugeltjes legt eier.
Kinderliedje bij het kloppen der fluitjes te Elspeet.

4. Neem een schelp - geen horentje, maar een helft van een tweekleppige schelp; bijvoorbeeld van de ‘stevige strandschelp’ (Mactra solida), waarvan er duizenden

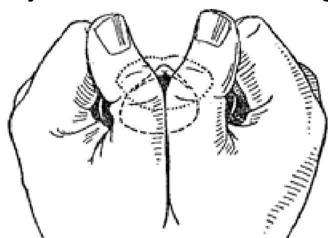


Fig. 24. Fluiten op een schelp.

langs onze stranden liggen. Druk er de twee duimen op, daarbij de eerste vingerkootjes uit elkaar buigend en de tweede vingerkootjes tegen elkaar aandrukkend (fig. 24). De hele schelpholte moet goed dicht zijn, met uitzondering van het spleetje boven tussen de twee duimen. In dit spleetje moet u nu blazen, met de half geopende mond, die u tegen de duimen aanlegt; de opening tussen de lippen is in de figuur

1) L. Brunner, Naturspielzeug (Ravensburg), blz. 23. - D.J. van der Ven over de folklore van dit kinderspel in ‘de Amsterdammer,’ 10 Juni 1922.

met een elliptische stippellijn aangegeven. U verkrijgt een zeer luide en hoge toon, des te hoger naarmate de schelp kleiner is.

5. Eikelfluitje.[1] - Houd het napje van een eikel tussen wijsen middenvinger, waar ze zich van elkaar scheiden, zodat de vingers de opening van het napje overdekken en slechts een nauwe spleet vrij laten. Druk de lippen lichtjes tegen de twee vingers en blaas.

1) G. Tissandier, Les récréations scientifiques (Paris), blz. 104.

Zomerwarmte en winterkoude.[1]

Bij de hevigste zomerhitte vindt de meteoroloog het nooit warm genoeg, want al stond de thermometer bij 100°, *dan zou hij hem voor de merkwaardigheid nog liever bij* 101° *willen zien. Bij de koudste temperaturen is het hem nooit koud genoeg, want al stond de thermometer bij* -30°, *dan zou hij nog verkiezen het kwik bevroren te zien. Zo is hij dus altijd gelukkig.*
C. Flammarion, l'Atmosphère, blz. 437 (1888).

60. Uitzetting van de rails door de hitte.

Het is algemeen bekend dat de spoorrails niet nauwkeurig mogen aansluiten, omdat ze anders door hun uitzetting in de zomer de spoorweg hobbelig zouden maken. In de Verenigde Staten laat men tussenruimten van bijna 1 cm, omdat daar met zulke enorme temperatuursverschillen moet worden gerekend!

We begeven ons naar een overweg en meten de lengte van de spoorrails en van enkele tussenruimten. Uitkomst nabij Bilthoven: 18 m en 7 mm (gemiddeld). Welk is het grootste temperatuurverschil dat de ingenieurs hebben voorzien? - Wel, de uitzettingscoëfficiënt van ijzer bedraagt 0,000011. Voor elke graad temperatuursverhoging zet een onzer rails dus 18000 × 0,000011 = 0,2 mm uit. Voorzien is dus een grootste temperatuurverschil van 7/0,2 = 35°.

Bij de tramlijnen in de stad zien we integendeel hoe de einden

1) Zie voor een groot gedeelte van dit hoofdstuk: Hann - Süring, Lehrbuch der Meteorologie (Leipzig 1926). - Van Gulik en van Everdingen, Leerboek der Meteorologie (Groningen, 1932). -
W. Schmidt, der Massenaustausch in freier Luft (Hamburg 1925). -
R. Geiger, Mikroklima und Pflanzenklima (in Köppen's Handb. d. Klimatologie, Berlin 1930).
- R. Geiger, Das Klima der bodennahen Luftschicht (Braunschweig, 1927).

der rails aaneengelast zijn: hier zijn er zoveel bochten, dat een kleine speling in de lengte gemakkelijk tot vereffening kan komen.

61. Thermometer.

Bijna al onze waarnemingen over warmteverschijnselen kunnen met een heel eenvoudige, goedkope thermometer geschieden. Bij voorkeur een kwikthermometer, omdat thermometers met andere vloeistoffen nogal sterk afwijkende waarden kunnen aanwijzen, ook al zijn de uiteinden van de schaal juist. Hij mag niet op een plankje zitten, maar moet bestaan uit een buisje of staafje dat vrij bewegelijk is; aan het bovenste uiteinde een oog, waar we een touwtje stevig aan kunnen bevestigen. De thermometerbol moet niet te groot zijn, wil hij snel en nauwkeurig in evenwicht komen met de omgeving. Kies vooral ook een duidelijke schaal!

Bij het aflezen houden we de thermometer nooit te dicht bij ons, ademen er vooral niet op, en schatten *eerst* de tiende delen van een graad, *daarna* pas het volle aantal graden (anders zou de nabijheid van ons lichaam hem al doen stijgen eer de fijnste aflezing geschied is)! 's Nachts belichten we met een elektrische zaklantaren.

We gebruiken uitsluitend de honderddelige schaal van Celsius. Als het gesneeuwd heeft, maken we van de gelegenheid gebruik om het nulpunt te controleren: doe wat sneeuw in een trechter, breng er de thermometerbol in, en wacht tot de sneeuw bij de warmte van onze huiskamer begint te smelten.

We kunnen ook onze thermometer vergelijken met een koortsthermometer, die meestal heel nauwkeurig aanwijst, door beide met gummibandjes aan elkaar te bevestigen, en ze samen in lauw water van 37°-40° te dompelen.

Wie zijn thermometer vast wil opstellen, hangt hem buiten, aan de Noordkant van het huis, voor het raam van een kamer (gang, bordes) waar niet gestookt wordt, tenminste 2 tot 3 m boven de grond.

Praktisch voor allerlei waarnemingen is een eenvoudige maximum-minimum-thermometer, die slechts weinig behoeft te kosten. Men stelt hem iedere ochtend in, en leest de hoogste en de laagste temperatuur af, die in het afgelopen etmaal zijn voorgekomen. De gemiddelde dezer twee getallen geeft met zeer voldoende nauwkeurigheid het temperatuurgemiddelde van de dag.

Voor verscheidene, verder te beschrijven onderzoekingen zouden we liever niet van een gewone thermometer gebruik maken, maar van een thermo-element of van een weerstandsthermometer. We

zullen ons echter houden aan de eenvoudige, goedkope kwikthermometer, die wel iets minder nauwkeurige, maar toch zeer bruikbare uitkomsten geeft.

62. De temperatuur aan het oppervlak van de grond.

Zet een thermometer zo in de grond, dat zijn kwikreservoir zich slechts enkele millimeters onder het oppervlak bevindt, maar nog net met een laagje aarde bedekt is. De proef moet geschieden op een heldere zomerdag, op mooi, open terrein, dat bijna gedurende de gehele dag door de zon beschenen wordt. Doe ook zoveel waarnemingen mogelijk gedurende de nacht. De temperatuurskromme (fig. 26) leert ons dat de aarde bij dag warmer was dan 's nachts, maar dat de hoogste temperaturen *na* de middag vallen, de laagste *na* middernacht. *De aarde heeft dus tijd nodig om door de zon verwarmd te worden*. Vergelijk de dagelijkse schommeling der oppervlaktetemperatuur bij onbewolkte, zonnige lucht, en bij zware bewolking: in het eerste geval is de temperatuurschommeling vele malen groter dan in het tweede. Het is dus wel de straling van de zon die de oorsprong is van de temperatuursveranderingen der aarde.

In Mesopotamië heeft men wel eens temperaturen van 80° aan de oppervlakte van zandgrond gemeten. Het zand onzer duinen kan op een windstille, heldere zomerdag temperaturen tot 45° en meer bereiken, terwijl het diezelfde dag, een paar uren na zonsondergang, soms tot 0° en zelfs lager daalt. De totale temperatuursschommeling kan dus 50° bedragen!

Verrassend hoog wordt ook de temperatuur van asfaltwegen. Sedert jaren is het te Rotterdam een volksgebruik, op zeer hete dagen eieren te bakken op het asfalt van de Aert van Nesstraat! De hoge temperaturen van zand- en asfaltwegen blijkt het mooist uit de luchtspiegelingen die men aan hun oppervlak kan waarnemen (I, § 32).

De straling die de zon en de heldere hemel ons toezenden, wordt dus voor een groot gedeelte door de grond opgeslorpt en in warmte omgezet. De verdere lotgevallen dezer warmte zullen we verder nog uitvoerig onderzoeken:

a. een gedeelte wordt door aanraking medegedeeld aan de lucht, die over de aarde strijkt (§ 69), opstijgende fonteintjes warme lucht en windwerveltjes veroorzaken uitwisseling tussen de onderste lagen en die welke zich daarboven bevinden;

b. een gedeelte wordt 's nachts weer uitgestraald (§ 71 tot 75);

c. een laatste gedeelte wordt gebruikt voor de verdamping, wanneer de grond vochtig is (§ 95).

Al naar gelang van het jaargetijde en het weer, krijgen die verschillende faktoren een wisselend belang.

63. Het verzamelen en weer afstaan van de warmte door de grond.

Om gaten in de grond te boren kunnen we een gewone schop gebruiken. Het gaat nog iets fraaier, als we door een smid voor

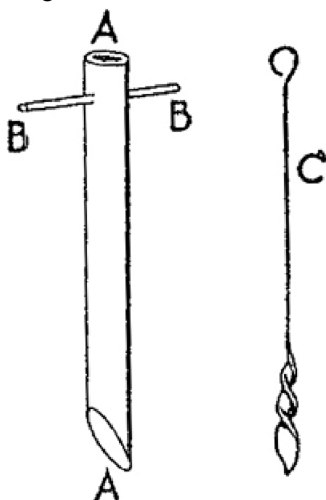


Fig. 25. Eenvoudige grondboor.

een paar gulden een stuk gasbuis schuin laten afzagen en hem vragen de schuine snede scherp te vijlen (fig. 25). Aan de andere kant wordt hij doorboord, zodat we hem met behulp van het staafje BB in de grond kunnen drukken, daarbij voortdurend draaiend. De uitgeboorde aarde vult de gasbuis, en wordt er af en toe met behulp van het ijzertje C uit losgemaakt. In enkele minuten kunnen we aldus gemakkelijk een gat van 50 cm diepte maken. Daarin laten we een thermometer aan een touwtje neer, en stoppen de opening met gras dicht. Na een paar minuten heeft de thermometer de temperatuur van de grond aangenomen; hij wordt *snel* omhooggehaald en afgelezen.

We kunnen nu onderzoeken hoe de temperatuur in de grond in de loop van een dag varieert. Het mooiste is, als we ons verscheiden thermometers kunnen verschaffen; ook goedkope soorten zijn voldoende, *mits we ze eerst onderling hebben vergeleken.* Elk der thermometers komt blijvend op een bepaalde diepte met zijn reservoir, terwijl het gat verder met aarde wordt gevuld: 0, 5, 10 cm; de thermometers met de grootste bollen worden in gaten van 20 en 40 cm diepte naar beneden gelaten, en bij de aflezing telkens naar boven gehaald. De plaats waar we de proef nemen moet liefst de hele dag zon hebben, en we kiezen een heldere, windstille, zonnige dag. Ook 's nachts en 's ochtends vroeg moeten we trachten aflezingen te verkrijgen.

De temperaturen worden grafisch voorgesteld (fig. 26): voor elke diepte krijgen we een kromme, die min of meer sinusvormig is. We kunnen nu prachtig bestuderen hoe de warmte door de grond wordt voortgeleid. Naarmate we dieper komen wordt de *amplitude* der temperatuurschommeling verrassend snel geringer

en verschuift de *phase*. In zandgrond is op 7 cm diepte de amplitude al tot de helft gedaald! Daar ligt de zgn. ‘halveringslaag’. Op 40 cm diepte komen de maxima en minima al bijna een half etmaal te laat! Blijkbaar is er beneden 50 cm niet veel meer te

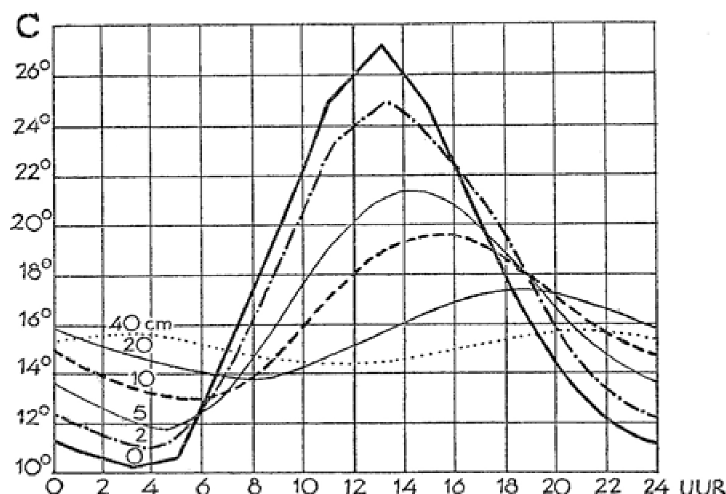


Fig. 26. De temperatuur op verschillende diepten in de grond gedurende een etmaal; helder, zonnig weer. (Naar van Gulik en Van Everdingen, Leerboek der Meteorologie).

merken van ‘de dagelijkse golf’. We zien dus dat deze golf ongeveer 40 cm in 12 uur heeft afgelegd, haar voortplantingssnelheid is ongeveer 4 cm/uur. Inderdaad is de warmtegeleiding van zand en aarde slechts zeer gering.

Door statistisch werk over lange termijn kan men aantonen dat de jaarlijkse golf van zomerwarmte en winterkoude zich wel wat dieper voortplant dan de dagelijkse golf (tot 10 m), maar nog veel langzamer loopt (5 cm per dag).

Uit onze krommen kunnen we voor verschillende ogenblikken van dag en nacht *de totale warmte-inhoud* van de grond berekenen. De waterwaarde per cm^3 van de grond wordt voorgesteld door c = soortelijke warmte × dichtheid, de temperatuur op diepte x zij t_1, de onveranderlijke temperatuur op het diepste punt waar wij gemeten hebben zij t_2. Dan is de totale warmteinhoud van een zuiltje met een doorsnee van 1 cm^2: $c\int_0^\infty (t_2 - t_1)dx$ gram-calorieen. Stel c gelijk aan 0,40 en bereken de integraal voor verschillende tijden. We vinden dat de warmte-inhoud 's ochtends vroeg gering is, dan toeneemt in de loop

van de dag; de toeneming is het snelst om middagtijd. 's Nachts wordt weer verloren wat in de dag was opgenomen. De temperatuur boven dewelke wij het warmte-overschot hebben berekend is betrekkelijk willekeurig; wat er op aankomt is niet de absolute waarde van de warmte-inhoud, maar zijn veranderingen.
Het verschil tussen de kleinste en de grootste warmte-inhoud is *de dagelijkse warmtegolf*. Zij bedraagt op een zomerdag in zandgrond zoiets als 20 tot 80 cal. per cm^2.
Vergelijk onderling de temperaturen die u in de bovenste lagen heeft gemeten: bij dag is het temperatuurverval en dus ook de warmtestroom van buiten naar binnen gericht, bij nacht omgekeerd.
Bepaal aan de duinen en aan het strand de temperaturen, de warmte-inhoud en de dagelijkse warmtegolf voor droog en voor vochtig zand. Doe hetzelfde voor moerasgrond. Herhaal deze waarnemingen bij verschillende weertoestanden. Onderzoek dicht begroeide heidegrond en vergelijk met kale heidegrond.
Maak in de winter een hoop sneeuw van 25 cm hoogte, en bepaal daarin op verschillende diepten temperatuur en dichtheid (§ 151). De dagelijkse warmteuitwisseling bij zonnig weer blijkt ongeveer 20 cal. per cm^2 te bedragen.[1)]
Boor in de herfst gaten van verschillende diepte in uw tuin, en onderzoek 's winters hoe diep de vorst in de grond doordringt. In grond die begroeid is, of met sneeuw bedekt, dringt hij veel minder diep door dan in onbedekte grond.
Meet de temperatuur van het grondoppervlak op een windstille, heldere voorjaarsnacht, en vergelijk de afkoeling van onbewerkte grond met die van grond, welke kort geleden flink omgespit is. U vindt, dat de bewerkte grond soms tot 6° lager afkoelt dan de onbewerktel Door de slechte samenhang tussen de korrels is de warmtegeleiding slechter, en krijgt de afkoelende oppervlakte bijna geen nieuwe warmtetoevoer uit de diepte[2)].

64. Het doordringen der warmte in vijvers en plassen.

Met onze eenvoudige thermometer kunnen we alleen de temperaturen van de bovenste lagen bepalen. Op een zomernamiddag meten we de temperaturen op verschillende diepten onder het oppervlak, telkens de thermometer 2 cm dieper in het water stekend en het water zo weinig mogelijk dooreenroerend. Nu stellen we onze metingen grafisch voor. We vinden dat het warme water bovendrijft, en dat de temperatuur dikwijls bij een zekere *spronglaag* vrij plotseling lager wordt. Bij volstrekte windstilte ligt die spronglaag dikwijls maar 5 cm diep, zodra de wind toeneemt komt ze dieper te liggen. Waar zoetwaterwieren drijven en de stromingen in het water belemmeren, is het verval nog steiler. Uit deze waarnemingen is het dus duidelijk dat het water het eerst nabij het oppervlak warmer wordt, dat water een slechte geleider van de warmte is, en dat de voortplanting der warmte

1) M.W.R. **35**, 450, 1907. De soortelijke warmte van ijs of sneeuw is 0,51.
2) W. Schmidt, in Geiger, Mikroklima und Pflanzenklima.

in diepere lagen vooral berust op de talloze wervelingen en onregelmatige stromingen die de wind veroorzaakt, als hij over het oppervlak strijkt. We zeggen, dat er *uitwisseling* plaats grijpt tussen de warme en de koude waterlagen, en dat die uitwisseling het gevolg is van *turbulentie*. De spronglaag geeft aan, hoe diep de werking van de wind zich doet gevoelen.

Het is belangwekkend de temperatuur van het oppervlak gedurende een geheel etmaal zo goed mogelijk te volgen (nauwkeurig aflezen!), terwijl terzelfdertijd die van het onbeschaduwde aardoppervlak gemeten wordt (fig. 27). Neem die proef liefst op

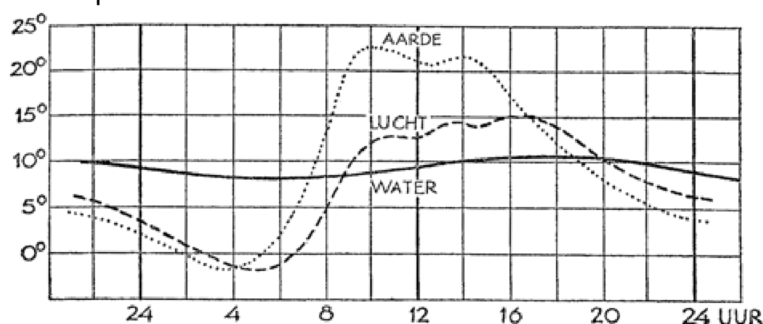


Fig. 27. De temperatuur van aardoppervlak, lucht en water, gedurende een etmaal; zonnige voorjaarsdag, Bilthoven.

een heldere late zomerdag met sterke temperatuurschommeling. De schommeling is veel groter voor de aarde dan voor het water; het temperatuurmaximum voor de aarde valt duidelijk na de zonnemiddag, maar dat van het water is nog veel meer vertraagd. Deze verschillen zijn vooral te wijten aan de grote bewegelijkheid van het water, waardoor de opgeslorpte warmte over een laag van aanzienlijke dikte verdeeld wordt, terwijl bij de aarde bijna alleen het oppervlakte-laagje de temperatuurwisselingen ondergaat.

65. De temperatuur in de diepte van kanalen, rivieren, meren.

Met een zeer eenvoudige kunstgreep kunnen we onze thermometer zó wijzigen, dat hij de temperatuur van het water op willekeurige diepte aangeeft! - Wikkel om de bol van de thermometer een flinke prop vetvrije watten, en bind die stevig vast

met garen; de prop moet ongeveer 4 cm hoog zijn en 2½ cm dik. Als u nu de thermometer op een gegeven diepte laat hangen, wordt de watten weldra met water van die laag gedrenkt, en neemt zijn temperatuur aan; trek nu snel de thermometer op, dan kunt u hem aflezen vóór zijn aanwijzing merkbaar veranderd is.

Vóórproef: neem een waskom met warm water en een waskom met koud water; dompel de thermometer met zijn watteprop eerst in de ene, dan in de andere, dan weer in de ene, en teken telkens op hoe de temperatuur zich instelt. Gaat het te snel, dan moet er watten bij; gaat het te langzaam, watten af; men bereikt b.v. gemakkelijk, dat de thermometer in de eerste ½ minuut niet merkbaar verloopt, en dat hij na 5 min. al praktisch de nieuwe temperatuur aanwijst.

Met het aldus voorbereide toestel kunnen we nu in 't vrije veld gaan meten. Aan het oog van de thermometer komt een dun touw, en een of ander metalen voorwerp om hem te bezwaren. Zo bleek b.v., dat in het Merwede-kanaal de temperatuur op een zonnige herfstmiddag slechts 0,2^{o} warmer was aan het oppervlak dan nabij de 3 m diepe bodem. De menging door de drukke scheepvaart was dus wel zeer volkomen.

66. Temperatuur van de zee.

Aan boord van een schip bepaalt men dagelijks de temperatuur van het zeewater, door met een emmer aan een touw water te scheppen, en een thermometer daarin te dompelen. In de loop van een dag schommelt ze meestal niet meer dan 0,5^{o}! Deze opvallende tegenstelling met het temperatuurverloop in de vaste grond is vrijwel geheel een gevolg van de grote roering, die het verwarmde water met het onverwarmde vermengt en tot uitwisseling brengt. Het zeewater dicht langs ons strand ondervindt natuurlijk iets meer invloed van de temperatuurwisselingen der aarde. Doe waarnemingen gedurende een zomerverblijf aan zee; neem een thermometer mee als u gaat baden, liefst op een rustige, zonnige dag. Meet de temperatuur op verschillende diepten vooral vlak onder het oppervlak, en herhaal dit op enkele verschillende ogenblikken van dag en nacht.

67. Het opzamelen van warmte in zoutmeren.[1)]

In de zoutmeren van Hongarije komt een zeer merkwaardige temperatuurverdeling voor: het water is verscheiden graden

1) Peterm. Mitt. **48**, 189, 1902. - Ann. d. Phys. **14**, 843, 1904.

warmer op een kleine diepte dan aan het oppervlak. Dit schijnt te wijten aan de aanwezigheid van een laag zoet water, die het zouthoudende water bedekt.

Het moet mogelijk zijn, dit verschijnsel op kleine schaal na te bootsen als we over een waschtobbe beschikken of over een teil van een dertigtal liter inhoud. Die plaatsen we in onze tuin op een plekje waar de zon onbelemmerd schijnen kan, en vullen ze eerst met gewoon water. Thermometerwaarnemingen 's middags omstreeks 13 u. leren ons dat de temperatuur op verschillende diepten weinig verschilt.

Nu gieten we in onze tobbe 30 kg soda per 100 liter water, en roeren en wachten en roeren weer, net zo lang tot alles opgelost is. Over deze geconcentreerde oplossing gieten we 's ochtends vroeg zeer voorzichtig gewoon water in een laagje van ongeveer 10 cm dikte, daarbij vermijdend in de vloeistof te roeren. Is alles op de juiste wijze uitgevoerd, dan zullen we bij onze middagaflezing bevinden dat het zoute water op 15 cm diepte van 2° tot 6° warmer is dan het zoete water bij het oppervlak; en dit verschil kan zich nog wel enkele dagen lang handhaven.

Vullen we de tobbe met gewoon water, en gieten er een laagje olie op, dan bemerken we de volgende dagen hoe het water vlak onder de olie veel warmer wordt dan de olielaag; het verschil kan 8° tot 19° bedragen!

Dat de temperatuurverdeling in deze verschillende gevallen zo abnormaal is, moet worden toegeschreven aan het ontbreken van convectiestromen. Terwijl gewoonlijk het verwarmde water naar het oppervlak stijgt, is dit nu onmogelijk wegens het grote soortelijke gewicht der diepere lagen. De bovenste lagen worden meer afgekoeld, de diepere lagen verliezen weinig warmte en vertonen een hogere temperatuur.

68. Hoe bepaalt men de temperatuur der lucht?[1)]

Als 't een hete dag geweest is, vindt men in de kranten dat ‘de temperatuur in de schaduw’ zó- en zoveel was, ‘de temperatuur in de zon’ nog veel hoger. - Dat is eigenlijk onzin! De lucht waait zo snel van de schaduw naar de zon, dat ze overal praktisch dezelfde temperatuur heeft. Wat is dan *de ware temperatuur van de lucht*?

Hang op een warme zonnige middag de thermometer in de

1) Köppen, Arch. d.d. Seewarte, **10**, 1887.

schaduw op; hij blijft staan bij 25°,4[1]. Hang hem in de zon: 26°,9. De reden waarom de thermometer in de zon hoger aanwijst, is, dat hij niet alleen warmte uitwisselt met de omringende lucht, maar ook *straling* opneemt van de zon en de omgevende hete voorwerpen.

Bewijs! We bevestigen een touwtje aan het oog van de thermometer, en 'slingeren' hem een minuut lang in de zonneschijn rond. Te hard slingeren dient tot niets, en tegen een ander ding aan slingeren maakt uw thermometer kapot! - Lees nauwkeurig af: 26°,1. De temperatuur is dus merkbaar lager dan we eerst vonden; we hebben door het slingeren de thermometer in aanraking gebracht met grote hoeveelheden lucht, die voortdurend ververst werd, zodat de rol der straling daartegenover van minder belang werd. Herhaal de proef 5 maal, snel achter elkaar, en zie of de temperatuur tot een min of meer constante eindwaarde nadert: 25°,9.

In de schaduw zijn de omringende voorwerpen niet veel warmer dan de lucht zelf; de temperatuur die we daar meten (25°,4) is ongeveer de juiste. Door slingeren krijgen we nu maar een klein verschil meer: 25°,1. *De temperatuur van een thermometer die in de schaduw geslingerd wordt is de beste benadering van de ware luchttemperatuur.*

We zullen nu laten zien, dat de onzichtbare, infrarode straling der omringende voorwerpen inderdaad een rol speelt, even goed als de zichtbare zonnestraling. U kunt bijvoorbeeld een afzonderlijke proef nemen in 'jonge' schaduw, die pas ontstaan is: 25°,7 (zonder slingeren). Blijkbaar zijn de omgevende voorwerpen hier nog niet zo mooi tot luchttemperatuur afgekoeld als in de 'oude schaduw' waar we 25°,4 vonden; de invloed van hun straling is nog merkbaar.

Tracht de invloed der straling te verminderen door de thermometer op een zonbeschenen plaats te hangen, maar hem door een blad papier tegen rechtstreekse straling te beschermen. Tot onze verbazing stijgt de temperatuur nog hoger dan zonder blad papier: 27°,9!

Verklaring: het papier wordt zelf ook warm en straalt op zijn beurt naar de thermometer.

We kunnen de thermometer nog onder een open paraplu hangen, die zich in de volle zon bevindt. Ook dit helpt heel

1) De hier opgegeven getallen, op één bepaalde dag verkregen, dienen alleen als voorbeeld.

weinig, integendeel: als de thermometer wat hoog in de paraplu hangt, wijst hij een iets hogere temperatuur aan dan vrij in de zon. De verklaring is weer dezelfde als voor het papieren scherm. Een witte paraplu is niet beter dan een zwarte: blijkbaar is hij even zwart *voor de infrarode stralen*, waar het hier op aankomt.

Daarentegen helpt het wèl, als men voor een paar dubbeltjes de thermometerbol in een glashandel laat verzilveren. Nu wijst de thermometer in de zon maar zeer weinig meer te hoog: $25^{\circ},6$.

Door de straling kan een thermometer even goed *te koud* aanwijzen als te warm. Hang op een stille, heldere nacht een thermometer een meter hoog boven een grasveld; hij wijst wel een graad lager dan wannneer u hem slingert. Hier straalt de thermometer zelf naar de wereldruimte, het ontstane tekort wordt niet intijds aangevuld, en zijn temperatuuraanwijzing valt te laag uit.

Het schijnt dat men een thermometer voldoende tegen nachtelijke uitstraling beschermen kan, door een dun aluminiumschijfje van 9 cm middellijn op ongeveer 2 cm boven de thermometerbol aan te brengen.[1]

69. De warmte-overdracht van de aarde aan de lucht.

Bepaal zo mogelijk elk uur de temperatuur in de schaduw, telkens de thermometer behoorlijk slingerend; in de nacht moeten we ook enkele waarnemingen uitvoeren. De kromme die door de waarnemingspunten gelegd wordt (fig. 27) vertoont in 't algemeen de hoogste temperaturen in de dag, de laagste 's nachts. De schommeling is bij heldere lucht wel drie of vier maal groter dan bij zwaar bewolkte lucht; het is dus erg de moeite waard, de proef op enkele dagen met verschillende bewolking te herhalen.

Bij heldere, rustige lucht valt het maximum zeer duidelijk *na* de middag, en wel omstreeks 14 uur. Dit is begrijpelijk, *doordat de lucht haar warmte niet rechtstreeks van de zon ontvangt, maar van de Aarde die door de Zon verwarmd wordt*; en die heeft tijd nodig eer haar temperatuur gaat stijgen, daarenboven heeft ze dan nog weer tijd nodig om haar warmte aan de lucht mee te delen.

Meet bij zonnig weer gedurende een etmaal zowel de temperatuur van de bovenste aardlaag als die van de lucht, en merk

1 S tzungsber. Akad. Bern, 806, 1918.

op hoe de temperatuurgolf van de lucht zeer merkbaar na die van de aarde komt (fig. 27).

's Zomers is de temperatuurschommeling van de lucht wel drie maal zo groot als 's winters; de proeven zijn dus in het warme jaargetijde mooier en overtuigender.

Over uitgebreide zee-oppervlakken wordt de dagelijkse temperatuurvariatie van de lucht zeer gering. Is dit gedurende een zeereisje waar te nemen? Dit verschijnsel bewijst ons eens te meer dat de luchttemperatuur door die van de bodem bepaald wordt, want we weten dat de zee in de dag maar heel weinig warmer is dan in de nacht (§ 66).

Daarentegen zijn vijvers en rivieren van weinig invloed op de omgevende lucht, die in hoofdzaak de temperatuurschommeling van de aarde volgt. Tussen de temperatuurgang in de lucht en in het water bestaat daar dan ook opvallend verschil.

Om het overbrengen der warmte van het bovenste aardlaagje naar de lucht te onderzoeken, bepalen we de temperatuur op verschillende hoogten boven een zandlaag op een hete, windstille zomermiddag. Bij een dergelijke waarneming werd gevonden:

op het zandoppervlak	50°
3 cm boven de grond	26°,4
30 cm boven de grond	20°,0
60 cm boven de grond	17°,2
150 cm boven de grond	17°,0

De sterk verhitte lucht der onderste lagen is lichter geworden en stijgt op, overal waar het terrein een oneffenheid vertoont of waar de wind wervelingen veroorzaakt. Men ziet in de verte de slieren hete en koude lucht door elkaar dwarrelen, alle heldere voorwerpen in de verte fonkelen (I, § 39). Zo reikt langzamerhand in de loop van de dag de invloed der verwarming steeds hoger, en doet zich tenslotte nog wel tot 1 km hoogte gevoelen, zij het in zeer verzwakte mate. Vergelijk deze uitwisseling met die welke zich in vijvers en meren afspeelt (§ 64).

70. De temperatuur gedurende zonsverduisteringen.

Gedurende zonsverduisteringen neemt de temperatuur van de lucht af; men kan om de 4 minuten de thermometer slingeren, aflezen, en de temperatuurkromme tekenen. Bepaal ook tevens de grondtemperatuur in de allerbovenste laag. Zowel bij de kromme die op de lucht betrekking heeft als bij die van de grond is het temperatuurminimum duidelijk vertraagd ten opzichte

van het stralingsminimum: een bewijs dat de aarde tijd nodig heeft om af te koelen en ook tijd om weer warm te worden, en dat de warmteveranderingen van de lucht onder de invloed van de aarde geschieden.

71. De nachtelijke uitstraling.

In een windstille, heldere nacht, op een grote open weide met hoog gras, bepalen we met een gewone thermometer de temperatuur der luchtlagen op verschillende hoogte boven de grond (aflezen met behulp van een zaklantaren). We vinden bijvoorbeeld het volgende tabelletje (fig. 28):

5 cm in de grond	5°
oppervlakte van de grond	4°
op de hoogte der grasprietjes	2°
1 m hoger	4°,5
2 m hoger	5°,5.

Door de nachtelijke uitstraling zijn de grashalmen en ook de grond afgekoeld, en nu kouder geworden dan de lucht daarboven. Planten met horizontaal afstaande

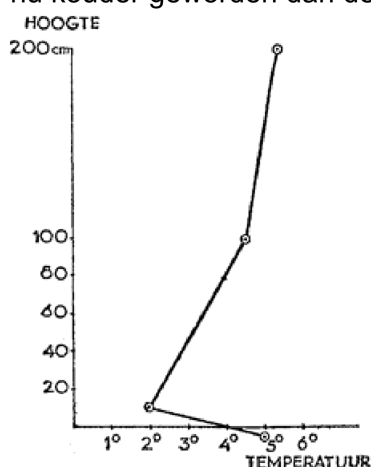


Fig. 28. De temperatuur op verschillende hoogte boven een grasveld; heldere nacht.

bladeren beschermen de grond enigszins tegen afkoeling. De grassen met hun vertikale sprietjes doen dit niet, ze vergroten integendeel het uitstralend oppervlak; men heeft kunnen aantonen dat ze vrijwel even goed stralen als roetzwart. Vandaar dat de weiden zich al zo snel na zonsondergang met dauw en nevel bedekken.

Beproef voor allerlei stoffen hoeveel ze door uitstraling afkoelen als u ze op een open terrein uitspreidt.[1)] Maak een vakje ruwe schapewol, andere met watten, flanel, zand, zaagsel, enz.; ieder vakje kan b.v. 20 × 20 cm groot zijn en 1 cm dik. De thermo-

1) Een onuitputtelijke reeks voorbeelden van dergelijke waarnemingen vindt men bij Glaisher, Philos. Trans. **137**, 119, 1847.

meter wordt eenvoudig neergelegd op de te onderzoeken stof, maar zonder dat hij erdoor bedekt wordt, en met zijn bol in het midden van het vakje; na enige minuten wordt hij afgelezen. In sommige gevallen zult u verrassend grote temperatuurverschillen met de lucht vinden: in zeer gunstige omstandigheden daalde de temperatuur van ruwe wol eens tot 16° onder de luchttemperatuur. Op een sneeuwlaag heeft men 11° verschil gevonden.[2)] De grootste verschillen ontstaan bij stoffen die veel uitstralen maar de warmte slecht geleiden, zodat ze weinig warmtetoevoer van de grond krijgen.

Stro, verfrommeld papier, wol, koelen meer af dan zand en kalk. Maar een weinig zand op het gras gebracht wordt bijna even koud als het gras zelf, omdat het nu geen warmte van de grond toegevoerd kan krijgen. Roetzwart koelt minder af dan wol, terwijl het toch meer uitstraalt, omdat het de warmte beter geleidt.

Van groot belang bij deze proeven is de toestand van de lucht. Hoe helderder de hemel, hoe sterker de nachtelijke uitstraling; hoge wolken doen de uitstraling al merkbaar geringer worden, lage wolken beïnvloeden haar nog veel sterker. Enkele voorbijtrekkende wolken zijn voldoende om de thermometer al een paar graad te doen stijgen; na hun verdwijnen daalt hij weer tot de eerste stand.

Bepaal gedurende de eerste uren na zonsondergang hoe de temperatuur van het aardoppervlak en die van de lucht afneemt (fig. 27). De temperatuurdaling geschiedt volgens dezelfde wet die de afkoeling van een warm voorwerp in een koelere omgeving bepaalt. Een uur of drie na zonsondergang wordt de daling langzamerhand geringer, wellicht doordat zich op zekere hoogte de reeds afgekoelde en de normale lucht beginnen te mengen. 's Ochtends vroeg na 4 uur schijnt er zelfs een geringe temperatuurtoeneming te merken te zijn, alsof er een ‘warmteschemering’ bestond.

Zoals uit deze temperatuurkromme blijkt, begint de nachtelijke afkoeling aan het aardoppervlak, en deelt zich geleidelijk aan de onderste luchtlagen mede. Maar terwijl we ons bij de verwarming overdag gemakkelijk konden voorstellen hoe de hete lucht in fonteintjes opwaarts steeg en de warmte overbracht, is het hier moeilijker te begrijpen dat de afgekoelde, onderste lagen hun invloed hogerop doen gevoelen. Het is gebleken dat dit voor een gedeelte door wervelingen gebeurt, maar op wind-

2) Arch. sc. phys. nat. **34**, 84.

stille nachten hoofdzakelijk door uitstraling van de lucht naar de afgekoelde bodem; deze uitstraling zou voor zuivere lucht veel te gering zijn, maar de vele stofjes, die in de dag met de hete lucht mee opgestegen zijn, kunnen heel wat warmte uitzenden, en koelen de lucht om hen heen af, terwijl ze langzaam naar beneden zweven.

Het verschijnsel, dat de temperatuur der lucht van beneden naar boven toeneemt, is het omgekeerde van wat we gewoonlijk bij dag waarnemen, en wordt daarom met de naam van *inversie* of *temperatuuromkering* bestempeld. Deze toestand van de dampkring is het, die aanleiding geeft tot het verschijnen van de lage avondnevels, en - bij sterkere ontwikkeling - tot luchtspiegelingen (I, § 32) en uitzonderlijke hoorbaarheid (§ 13).

72. Nachtvorst.

Gewoonlijk ontstaat vorst door koude luchtstromingen die van andere streken komen. Maar op heldere, rustige nachten in de lente en de herfst speelt de nachtelijke uitstraling de voornaamste rol: de grond koelt af, de lucht die ermee in aanraking is geweest stroomt als een vloeistof over het plantenkleed der aarde en doet de jonge blaadjes en twijgen bevriezen. Temperatuurmetingen met twee goedkope minimum-thermometers, op verschillende hoogte, bewijzen, dat de koude lucht zich op de bodem der dalen verzamelt en daar 'vorstmeren' vormt; deze dalen zijn daarenboven goed tegen de wind beschut, zodat er bijna geen uitwisseling met de hogere luchtlagen plaats grijpt. Tijdens een avondwandeling voelt men dan duidelijk dat het



Fig. 29. Plaatsen waar op heldere voorjaarsnachten komvorst ontstaat.

warmer is op de heuvel dan in de vallei. Dikwijls kan men door waarneming der bevroren planten uitmaken hoe de temperatuurgrenzen ongeveer verliepen; de vorst beschadigt eerst de lage planten en de basis der stammen, terwijl de plantendelen die zich hoger bevinden onverlet blijven. Een strook bos blijkt als een dam te hebben gewerkt die de koude lucht tegenhield en

belette weg te vloeien (fig. 29*a*); het uitroeien van een klein gedeelte is al voldoende om het ‘vorstmeer’ te laten leeglopen! Elk stuk grond met jonge aanplant te midden van gewoon bos is een verzamelplaats voor koude vorstlucht. Een spoorwegdijk op zwak hellend terrein verhoogt de kans op nachtvorst aan de zijde die het hoogste ligt (fig. 29*b*); zoudt u geloven dat een helling van ⅓% al voldoende is om tot dit effect aanleiding te geven? En dat een viadukt een belangrijke invloed kan hebben door het wegvoeren der koude lucht?

In vlak, gelijkmatig terrein worden de planten op schijnbaar grillige wijze aangetast. Soms vertonen zij het typische, verlepte uiterlijk van bevroren planten over onregelmatige gebieden van 1 tot 20 meter middellijn; daar omheen staan dezelfde planten in ogenschijnlijk dezelfde omstandigheden, maar geheel ongedeerd; het ene aardappelen- of bonenveld lijdt veel meer dan het andere. Men onderstelt dat een klein verschil in de hoogte van het grondwater dergelijke grilligheden zou kunnen verklaren. In andere gevallen gaat het om verschillen in uitstralend vermogen.

In lichtingen en kommen is er ook daarom al meer vorst, omdat de bomen of de hellingen de vrij sterke hemelstraling afschermen die onder kleine hoeken met de horizon invalt. Hagen daarentegen houden wel die hemelstraling tegen, maar stralen zelf sterker, zodat ze eer tegen vorst helpen.[1)] Het is bekend dat in een vlak terrein hoge bomen de planten aan hun voet tegen nachtvorst beschermen; dikwijls is de beschermende werking van één enkele boom al goed waar te nemen. Deze verschijnselen zijn dus soms vrij ingewikkeld en schijnbaar tegenstrijdig.

Zoek overal sporen van de nachtvorst en beproef te verklaren waarom ze hier wel, daar niet zijn opgetreden! Let in 't bijzonder op het eikenhakhout!

Het is voor de land- en tuinbouw van groot belang 's avonds te kunnen voorspellen of we nachtvorst zullen krijgen. Veel hangt er van af of de lucht droog of vochtig is. Want bij vochtige lucht verliest de aarde minder warmte door verdamping en door straling; en zodra de temperatuur tot het dauwpunt gedaald is en er dauw ontstaat, daalt de temperatuur niet verder meer en stijgt zelfs dikwijls, doordat er condensatiewarmte vrijkomt. De volgende regel schijnt vrij zeker: nachtvorst is onwaarschijnlijk als de natte thermometer 's avonds te 21 u. tenminste 6° aanwijst (vgl. § 91).

1) G. Falckenberg, Met. Zs. **48**, 22, 1931.

Daarnaast is wind de voornaamste faktor, die door het veroorzaken van roering het nachtvorstgevaar afwendt. Onze voorspelling zal ook in belangrijke mate van die faktor moeten afhangen. Voor de invloed der grondbewerking, vgl. § 63.

73. De vorst en de planten.[1)]

Vroeger meende men dat de planten die bevriezen sterven, omdat het zich vormende ijs de celwanden scheurt. Men heeft ook gedacht, dat de vakuolewanden der cellen hun halfdoorlatende eigenschappen verliezen, zodat de turgor in de plant verloren gaat en deze verslapt. Thans schijnt het wel zeker, dat de schadelijke werking bestaat in het beletten van de watertoevoer van uit de wortels, terwijl de plant voortgaat met verdampen: *ze droogt dus uit*. Bij een temperatuur beneden het vriespunt zijn helder zonnig weer en krachtige wind bijzonder gevaarlijk voor de planten, want zij bevorderen de verdamping. Dikwijls kan men opmerken dat de Noordzijde van een boomkroon minder beschadigd is dan de Zuidzijde. De soorten die in de winter groen blijven hebben 's winters alle een hoge osmotische druk, of zijn zo gebouwd dat ze buitengewoon weinig verdampen.

Voor elke plant is er een temperatuur aan te geven waarbij de bloemen, bladeren of twijgen bevriezen. Met een eenvoudige minimumthermometer kunt u aldus de inwerking van de nachtvorst onderzoeken op de verschillende plantensoorten, en nagaan bij welke temperatuur 20% of 50% der individuen bevroren zijn.

De werking van de vorst is des te gevaarlijker naarmate hij langer duurt. Met een minimum-thermometer vindt men dikwijls dat er een weinig nachtvorst in het gras geheerst heeft, zonder dat het gras zelf of de vrij tere plantjes die ertussen groeien ook maar in 't minst geleden hebben. Blijkbaar was de temperatuur slechts tegen de ochtend onder nul gedaald, en werd ze korte tijd nadien weer door het opgaan der zon verhoogd. Zulk een kortstondige inwerking schaadt de meeste planten niet; daarenboven bevat het celvocht verschillende stoffen in oplossing en heeft het dus zijn vriespunt iets beneden 0°. Zeer lang aanhoudende temperaturen van een paar graden onder het nulpunt zijn echter op den duur stellig noodlottig.

1) H. Walter, Naturwiss. **17**, 854, 1929.

74. Het beschermen van planten tegen nachtvorst.

W.Ch. Wells vertelt het volgende in zijn beroemd 'Essay on Dew' (1814, blz. 252).

'In de hoogmoed ener halve wetenschap had ik dikwijls geglimlacht over de middelen die tuiniers gewoonlijk gebruiken om tere planten tegen koude te beschermen, daar het mij onmogelijk scheen met een dunne mat, of een dergelijk los weefsel, te verhinderen dat zij de temperatuur van de dampkring zouden aannemen; hetgeen ik beschouwde als het enige waardoor ze schade konden lijden. Maar toen ik ervaren had dat lichamen, nabij het oppervlak der aarde geplaatst, in een stille en heldere nacht kouder kunnen worden dan de dampkring door hun warmte uit te stralen naar de hemel, begreep ik ineens de juiste reden voor de gewoonte die ik eerst nutteloos had geoordeeld.'

Wells plantte in een grasveldje 4 stokjes, die 15 cm boven het gras uitstaken, en wel aan de hoekpunten van een vierkant van 65 cm × 65 cm. Daarover spande hij een handdoek van zeer dun linnen. Hij vond nu dat de temperatuur van het gras altijd hoger was onder dit tentje dan ernaast, bijna zo hoog als de temperatuur van de lucht (slingeren!) De uitstraling was dus onder die bedekking wel zeer gering.

We weten thans, dat het beschermen der planten in de winter met stro, bast, of takken nog een ander doel heeft, dat tenminste even belangrijk is: het belemmert de diffusie van de waterdamp, en heeft dus voor gevolg dat de plant minder verdampt. Het voornaamste gevaar van de koude, de uitdroging, wordt aldus bezworen (§ 73).

75. De Bengaalse methode om ijs te maken.[1)]

Dit is een proef voor een heldere voorjaars- of najaarsnacht. Op een open stuk grond (in onze tuin, in de hei) bedekken we een vierkant van 90 cm × 90 cm met een 15 cm hoge laag droog stro. Hierop plaatsen we een horlogeglas en verschillende vlakke aarden pannen, zo poreus mogelijk, alle met water gevuld.

Reeds enige tijd na zonsondergang heeft u kans een dun ijslaagje op het water te ontdekken, terwijl de thermometer op één meter hoogte nog verscheiden graden boven het vriespunt wijst (in sommige gevallen tot 8°; slingeren!). De thermometer

1) W.Ch. Wells, Essay on Dew, blz. 272.

wijst echter beneden het vriespunt, wanneer we hem op het stro leggen. Het is dus duidelijk dat de temperatuurdaling door uitstraling van de voorwerpen op het aardoppervlak ontstaat, terwijl het slecht geleidende stro belet dat ze nieuwe warmte van de grond toegevoerd krijgen. Zijn de schalen poreus, dan helpt de verdamping om de temperatuur nog iets lager te maken, maar het horlogeglas bewijst dat die factor geen belangrijke rol speelt. De thermometer die op het stro ligt straalt evenzo uit en koelt dus om dezelfde reden als het water af.

76. De temperatuur van de grote stad.[1)]

De forensen die te Bilthoven wonen, en op een heldere winteravond naar een concert te Utrecht zijn gaan luisteren, merken bij de terugkeer in hun dorp altijd op dat het daar kouder schijnt dan in de stad. Is dat waar? En in het algemeen: is het klimaat van de stad anders dan dat van haar omgeving?

Dit vraagstuk en veel dergelijke zijn prachtig op te lossen als men over een auto beschikt. We rijden dwars door de stad en haar naaste omgeving, eenmaal heen, eenmaal terug, en lezen telkens om de kilometer de thermometer af, die we op een geschikte plaats naar buiten steken. Nu is het waar dat in de loop van de waarnemingen de temperatuur merkbaar veranderen kan; maar daarom nemen we op elk punt ook 't *gemiddelde* der temperaturen bij de heen- en terugrit op: dit geeft een vrij juist beeld van de temperatuurverdeling op een bepaald tijdstip.

Door dergelijke metingen vindt men geregeld, dat de stad iets warmer is dan haar omgeving. In een bepaald geval was de temperatuur van een grote stad op een mooie zomerdag ongeveer 1° hoger dan die der omgeving, terwijl 's avonds de stad 7° warmer was! Blijkbaar was de nachtelijke uitstraling in de stad geringer, ook zijn de warmtecapaciteit van de baksteen en de warmte van de duizenden vuurhaarden in woonhuizen en fabrieken zeker niet te verwaarlozen. Daar het windstil was, werden de luchtmassa's bijna niet dooreengemengd; men kon opmerken dat de koudere lucht der landelijke omgeving geleidelijk langs de grote straatwegen naar de stad stroomde. Op 5 tot 10 m hoogte bevond zich een ‘inversielaag’, d.i. een laag beneden dewelke

1) Zs. f. angew. Meteor. **46**, 305, 1929. - J.R.A.S. Canada, **30**, 265, 1936. - A. Kratzer: das Stadtklima (Vieweg, 1937). - Kenmerkende eigenaardigheden van het stadsklimaat zijn reeds in vrij kleine plaatsen teruggevonden; vgl. E. Meyer, Met. Zs. **52**, 26, 1935.

het kouder is dan erboven; dit kon men daaraan merken, dat de rook van de treinen op die hoogte bleef hangen en zich horizontaal uitspreidde.

Zo is de auto een prachtig hulpmiddel om de meteorologische toestand en inzonderheid de luchttemperatuur te vergelijken binnen een beperkt gebied, waar men onmogelijk zeer veel stations zou kunnen oprichten. De invloed van dalen en heuvels, het verloop van een onweersfront, de vorming van nevels zijn op deze wijze dikwijls goed te bestuderen. Natuurlijk moet er op gelet worden dat de thermometer niet beïnvloed wordt door de nabijheid van de hete motor, maar dat schijnt nogal mee te vallen; door de snelle beweging neemt hij juist de temperatuur der lucht zeer goed aan.

Op de fiets zijn dergelijke waarnemingen iets minder goed uit te voeren, maar allicht is daar toch nog veel van te leren.

Zeer belangwekkend is een onderzoek naar de dagelijkse temperatuurgang op een plein, in een laan, in een nauwe straat. Als men 's zomers de temperatuur bepalen kan in een aantal punten en op verschillende hoogte in een straat met hoge huizen, kan men daaruit besluiten hoe de luchtstromen gericht zijn, welke de lucht in die straat verversen[1].

77. De temperatuur in het bos.[2]

De heerlijke friste die we in het bos voelen op een warme dag doet ons vermoeden, dat we een sterk temperatuurverschil met de lucht daarbuiten zullen vinden. Maar zie! De thermometer, in het beukebos en daarbuiten in de schaduw geslingerd, wijst zelfs op een warme zomernamiddag slechts een temperatuurverschil van een graad of een paar graden aan! Om helemaal zeker te zijn dat de thermometer geen invloed meer ondervindt van de wind die pas door 't bos gewaaid is, verwijderen we ons tenminste 100 m van de bosrand. Daarenboven herhalen we de proef verschillende malen en nemen gemiddelden.

In het dennebos is het verschil nog minder duidelijk.

De vochtigheid blijkt iets groter te zijn; het verschil is het duidelijkst omstreeks 5 u. van de namiddag en kan in het beukebos 6% bedragen. Maar dit is stellig geen verklaring voor ons gevoel van verfrissing, integendeel (zie § 86)!

We moeten dus aannemen dat deze indruk op het wegvallen der rechtstreekse zonnestraling berust; een paraplu geeft ons nooit

1) Albrecht, Met. Zs. **50**, 93, 1933.
2) R. Geiger, Das Klima der bodennahen Luftschicht (Vieweg, 1927).

dezelfde indruk, omdat hij de warmte teveel opslorpt en op zijn beurt uitstraalt (§ 68). De bladeren van de bomen zijn daarentegen zo goed gekoeld door de wind en door de verdamping, dat ze praktisch geen straling meer uitzenden.

Metingen op allerlei hoogten in het bos leren ons, dat de luchttemperatuur onder de boomkruinen overal dezelfde is. De boomkruinen vormen een 'effektief oppervlak' dat enigszins dezelfde rol speelt als het aardoppervlak op een gewoon onbegroeid terrein. Het opvallende temperatuurverschil bijvoorbeeld dat we in heldere, rustige nachten gevonden hebben tussen de luchtlaag bij de grond en die op 1 meter hoogte, bestaat in het bos niet.

Het is een bijzonder buitenkansje als we gebruik kunnen maken van een waarnemingsladder of een uitzichttoren die te midden van het bos geplaatst zijn. We kunnen dan geregeld de temperatuur in het bos vergelijken met de temperatuur boven de boomkruinen, en opmerken hoe gering de verschillen zijn. Ze treden vooral 's ochtends op, na zonsopgang, wanneer de nachtelijke koelte nog wel een uur lang in het bos blijft hangen, terwijl daarboven de kruinen al verwarmd worden door de eerste zonnestralen. Als we dan het hoofd boven de laag der boomkruinen uitsteken, bemerken we hoe daar een dichte wolk van vliegen, muggen en ander gedierte aan 't zwermen is, alsof de gehele insektenbevolking van het bos samengedrongen was in dat éne dunne laagje waar licht en warmte te vinden zijn! Ook 's avonds na zonsondergang is er enig verschil: het blijft dan nog warm in 't bos, terwijl de kruinen daarboven reeds door straling afkoelen; maar het verschil is geringer dan 's ochtends, omdat de koude lucht gemakkelijk tussen de bladeren naar beneden vloeit.

De eigenaardigheden van temperatuur, vochtigheid, windsterkte in de stad of in het bos, duidelijk onderscheiden van die in de omgeving, worden het best tot uitdrukking gebracht door te spreken van '*het lokale klimaat*' dat in deze verschillende gebieden heerst.

78. Temperatuur in een korenveld[1] (fig. 30).

We doen onze metingen op twee kenmerkende tijden: een zomermiddag en een zomernacht.

A. 's Middags bij zonneschijn. - Meet de temperatuur op verschillende hoogten boven de grond in en boven het korenveld.

1) R. Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht (Vieweg, 1927).

Als we van boven beginnen, vinden we eerst een snelle temperatuurtoeneming zodra we in het koren komen, daar waar een deel van de zonnestraling door de korenhalmen geabsorbeerd en in warmte omgezet wordt. De temperatuur stijgt enkele graden,

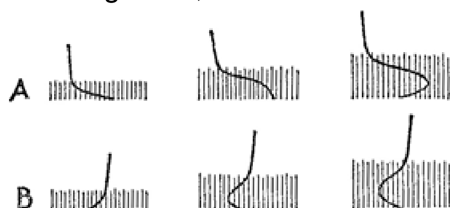


Fig. 30. Temperatuur in een korenveld. A. bij dag; B. bij nacht.
De vertikale lijnen stellen de halmen voor; de kromme lijn geeft het tempeatuurverloop weer: hoe meer ze naar rechts afwijkt, des te hoger temperatuur.

tot een maximum, dat bijna geheel beneden, dicht bij het aardoppervlak ligt. Alleen als het koren hoger dan 1 m wordt, komt het temperatuurmaximum hoger te liggen, maar nooit hoger dan 50 cm boven de grond. Blijkbaar is de straling aan de voet van zulke hoge korenhalmen reeds zeer merkbaar verzwakt, en staan de halmen zo dicht op elkaar, dat de warme lucht van de middenste lagen niet met de koudere lucht van de onderste lagen vermengd wordt.

B. 's Nachts. - De uitstraling gebeurt vooral door de toppen der halmen. De daar afgekoelde lucht zinkt, en wordt door de dicht op elkaar groeiende stengels goed tegen de wind beschermd: de lucht in een korenveld is dan ook merkbaar kouder dan er boven. Maar zodra de halmen enige hoogte hebben bereikt, ligt het minimum toch niet vlak bij de grond maar iets hoger.

79. Temperatuur in verschillende plantengemeenschappen.

We hebben het temperatuurverloop onderzocht in het bos en in het korenveld. Maar het is ook de moeite waard, metingen te doen bij andere planten: hoge hei, een aardappelveld, aardbeiplanten, bloembollenvelden, bloembedden in de tuin. Het verloop van de temperatuur met de hoogte is telkens weer verschillend, omdat de opslorping van de straling, de konvektie van de lucht en de wederuitstraling op allerlei verschillende wijzen gebeuren kunnen. De gegevens die men uit zulke metingen verkrijgt zijn voor de land- en tuinbouw van groot belang, want ze leren ons hoe in éénzelfde streek het *mikroklimaat* van plaats tot plaats verschilt, hoe iedere plant feitelijk in haar eigen klimaat leeft en in zekere mate haar eigen klimaat schept.

80. Temperatuur in een boom.[1)]

De temperatuur in het hart van een boomstam verschilt dikwijls aanzienlijk van de temperatuur der lucht. Meestal is hij warmer in de winter, kouder in de zomer. Bij vorst daalt de temperatuur in de stam tot het vriespunt der sappen bijna bereikt is, en blijft dan onveranderlijk: blijkbaar is er een mechanisme in de plant dat een verdere daling belet, zolang de temperatuur buiten niet al te laag wordt.

Om deze waarnemingen te doen moeten we een gaatje in de stam boren. Dit betekent meestal voor later zijn ondergang! Kies dus een waardeloze boom of een boom die toch weldra zal geveld worden.

81. Temperatuur van hout in de zon.[2)]

Kleine houten blokjes, voorzien van een centrale boring, 3 cm × 3 cm × 3 cm groot, worden met olieverf in verschillende kleuren geschilderd, op een latje vastgeschroefd en aan de volle zonneschijn blootgesteld. In ieder blokje komt een thermometer, met een beetje olie in de opening kan de goede warmteoverdracht van het hout op de thermometer verzekerd worden.

Het is verrassend welke hoge temperatuur de houten blokjes bereiken kunnen, als het weer maar *geheel windstil* is. De thermometers wijzen soms 12° tot 17° boven de temperatuur van de buitenlucht! Een blokje dat met roetzwart bedekt was haalde 19°! Zodra er ook maar enige wind was daalden die getallen met 30% of zelfs 60%. Opvallend is het kleine verschil tussen de blokjes onderling: blijkbaar zijn al die verfsoorten min of meer ‘zwart’ voor de infrarode stralen.

Door een wit laken achter de blokjes te plaatsen werd hun temperatuuroverschot boven de omgevende lucht nog met 30% vermeerderd, dank zij de teruggekaatste straling die ze van het grote witte vlak ontvingen.

Na zonsondergang kan men nog nagaan, dat de blokjes volgens de afkoelingswet van Newton afkoelen: het temperatuurverschil met de lucht daalt exponentieel met de tijd.

1) Prinz, Nat. **49**, 271, 1894.
2) C. Dorno, Beitr. z. Geoph. **32**, 15, 1931.

82. Temperatuur in grotten.

We hebben gezien hoe weinig de temperatuur nog verandert op een diepte van 40 cm onder de grond (§ 63). Op één meter diepte vinden we al vrijwel de gemiddelde jaartemperatuur van een streek.

Men zou nu kunnen verwachten dat men in grotten overal deze zelfde gemiddelde temperatuur zal aantreffen. Doe metingen in de St. Pietersberg bij Maastricht, in de grotten der Ardennen en elders.

In het algemeen vindt men wel degelijk verschillen, en op éénzelfde plaats zijn de temperaturen volstrekt niet alle dagen dezelfde: er kan tocht zijn, daardoor weer verdamping; de koude lucht kan zich op de diepste punten verzamelen; enz.

83. De warmte in een broeikas.

Bepaal met een thermometer de temperatuur in en buiten een broeikas; vergelijk! In de glazen telefooncellen te Utrecht is de temperatuur op een zonnige lentedag 30° tegen 15° buiten.

Vroeger werd betoogd dat de zonnestraling de wanden en de grond verwarmt, en dat de straling die ze zelf uitzenden zeer ver in het infrarood ligt, dus door het glas niet meer doorgelaten wordt; aldus zou de warmte niet meer naar buiten kunnen en zich in de broeikas opeenhopen.

Wood heeft getracht aan te tonen dat een kas, afgedekt met steenzout (dat de verre infrarode straling wel degelijk doorlaat), tenminste even warm wordt als een glazen broeikas. Het glas houdt *feitelijk* de verre infrarode stralen *niet* tegen: het slorpt ze op, geleidt de verkregen warmte tot zijn buitenoppervlak, en straalt op zijn beurt weer infrarood uit. Het gehele 'broeikas-effekt' zou alleen daarop berusten, dat de verwarmde aarde niet door de luchtstromen afgekoeld wordt.

Toch is later weer gebleken, dat zowel de verminderde uitstraling als de verminderde convectie een rol spelen; inzonderheid de bescherming tegen de nachtelijke uitstraling is van belang.[1)]

84. De temperatuur van de grond onder een sneeuwlaag.

Iedereen beweert dat de sneeuw de planten tegen bevriezen beschermt. Maar wie van ons heeft het ooit gemeten? - Een onderzoeker[2)] heeft telkens de temperatuur van het aardopper-

1) W. Schmidt, Met. Zs. **26**, 458, 1909.
2) Bührer, Met. Zs. **19**, 205, 1902.

vlak bepaald door een thermometer dwars door de sneeuwlaag te steken tot de bol de grond bereikte; daarnaast werd de temperatuur van de bovenste sneeuwlaag gemeten. Gemiddeld was de eerste 5° warmer dan de tweede; reeds 1 cm sneeuw gaf beschutting, 5 cm hielpen al veel, 20 cm gaven de maximale beschutting.

Men kan ook de temperatuur vergelijken van het aardoppervlak *met* sneeuw en *zonder* sneeuw, en vindt dan een dergelijk verschil.[1)]

Zo kan men begrijpen, dat in strenge winters de bomen langs de lanen onzer steden, waar de sneeuw geruimd wordt, soms bevriezen, terwijl diezelfde soorten buiten onbeschadigd blijven.

Deze opvallende beschermende werking van de sneeuw is ten dele toe te schrijven aan zijn slechte warmtegeleiding, ten dele aan het tegenhouden der uitstraling van de aarde. Men heeft gevonden dat het geleidingsvermogen van de sneeuw ongeveer evenredig is met het kwadraat van zijn dichtheid (§ 151): verse sneeuw beschermt dus beter dan oude.

85. De temperatuur van de regen.

Men hoort zo dikwijls spreken van ‘een warme voorjaarsregen’, ‘een ijskoude regen’, dat men zich gaat afvragen hoe de werkelijke temperatuur van de regen is. Met onze eenvoudige middelen kunnen we dit alleen onderzoeken bij grote regendruppels en overvloedige regenval; het is dan voldoende de thermometer in de regen te houden, en te wachten tot hij een constante eindwaarde heeft bereikt. Men kan hem ook in het regenwater houden dat uit de goot stroomt; na enig wachten vindt men dan dezelfde temperatuur als die der druppels. Of men naait een zak van dun zeildoek, met een opening onderaan, waardoor de regen in een reageerbuisje geleid wordt (niet met de hand vasthouden!)

Vergelijk de temperatuur van de regen met die van de lucht, ongeveer gelijktijdig bepaald onder een afdakje bijvoorbeeld: het blijkt dat de regen vrijwel nooit warmer is dan de lucht, soms 0° tot 3° kouder.

86. Subjektieve temperatuurschattingen.

Schat in allerlei weersomstandigheden onbevooroordeeld de temperatuur, en onderzoek daarna met een thermometer hoeveel u zich vergist heeft!

Eigenlijk is dat subjektieve temperatuurgevoel iets geheel

1) Ljoeboslavski, Peterm. Mitt. **57**, 41, 1911.

anders dan wat de thermometer aangeeft. Het wordt bepaald door de warmte-afvoer per sekunde van onze huid, en die hangt niet alleen af van de temperatuur *t*, maar ook van de windsnelheid *v* en de vochtigheidsgraad van de lucht *f* (in mm kwik; vgl. § 91). Uit een combinatie van berekening en waarneming berekent Hill deze warmte-afgifte H en vindt: $H = (36{,}5 - t)\,(0{,}12 + 0{,}54\sqrt{v}) + (0{,}085 + 0{,}102v^{0,3})\,(45 - f)^{4/3}$.

Men vindt hier tot uitdrukking gebracht, dat de warmte-afvoer des te groter is naarmate de luchttemperatuur lager onder die van de huid ligt, naarmate de windsterkte toeneemt en naarmate de huid meer verdampt.

We kunnen de temperatuur *t* gemakkelijk bepalen door een thermometer te slingeren (§ 68). De windsnelheid *v* meten we door een heel ijl wattepluisje met de wind te laten meevoeren; een helper roept op welk ogenblik het pluisje hem voorbijvliegt, terwijl wij sekunden tellen. De vochtigheid heeft minder invloed, maar kan ook eenvoudig gemeten worden zo men dit wenst (§ 91).

De berekening wordt bespoedigd door gebruik te maken van de twee hierbijgevoegde tabelletjes, die de eerste resp. de tweede term aangeven waaruit H bestaat. Haal uit elke tabel het getal dat bij de omstandigheden past, en tel de twee getallen op.

Als de som H < 13 noemen we het weder *zwoel*;

als 13 < H < 30 noemen we het weder *warm*;

als 30 < H < 50 noemen we het weder *koel*;

als 50 < H noemen we het weder *koud*.

Merk op dat volgens de tabellen bij zeer droge lucht en felle wind het weder koud kan lijken, ook al wijst de thermometer 20°! Bemerk ook hoe 's winters de zwakste wind al de indruk van ‘koel’ naar ‘koud’ doet omslaan. Dit alles klopt werkelijk met de ervaring!

***t* =**	**-30°**	**-20°**	**-10°**	**0°**	**10°**	**20°**	**30°**	**40°C.**
v = 0	8	7	6	4	3	2	1	- 0,4
2	59	50	41	33	24	15	6	- 3
3	70	60	49	39	28	17	7	- 4
4	80	68	56	44	32	20	8	- 4
8	110	93	77	60	44	27	11	- 6
16	152	129	106	83	61	38	15	- 6
20	169	143	118	93	67	42	16	- 9
25 m/sec.	188	159	131	103	75	47	18	- 10

***v* =**	**0**	**2**	**5**	**10**	**15**	**20 m/sec.**
f = 1	13	33	39	45	49	52
2_5	13	31	37	43	46	49
5	12	29	34	39	43	45
7_5	11	26	31	36	40	42
10	10	24	29	33	35	38
12_5	9	22	25	30	33	35
15	8	20	23	27	29	31
20	6	15	18	21	23	24
25 mm	5	11	14	17	17	18

Toch zal soms uw beoordeling anders uitvallen dan volgens de tabellen verwacht wordt. Als u *geleerd* heeft, door veel waarnemingen, *onbewust rekening te houden* met de invloed van vochtigheid en windsnelheid, zult u veel dichter bij de thermometertemperatuur schatten dan bij de physiologische. Maar dit is niet meer de onbevooroordeelde indruk waar het hier op aankomt!

Om een soort maatstaf te hebben voor het gevoel van warmte of koude, kunnen we de temperatuur van de huid meten. Dat hoort eigenlijk te geschieden met een gevoelig thermo-elementje. Maar we krijgen toch al zeer bruikbare uitkomsten met een gewone thermometer, waarvan het kwikreservoir niet te groot moet zijn. Begin met het *vóórwarmen* van het thermometervat tot ongeveer 33° in de *rechterhand*, en houd hem daarna tegen de *linkerhand* tussen de wortels van duim en wijsvinger; met een druppel olie wordt de aanraking tussen thermometer en huid al vrij voldoende. Na 2 of 3 minuten stijgt de thermometer niet meer en kan de temperatuur van de huid afgelezen worden. Tussen de temperatuur van de huid en onze subjektieve indrukken vond men de volgende betrekking:[1)]

huidtemperatuur	indruk
	zeer warm
37°_5	
	warm
34°_5	
	zacht
32°_4	
	gematigd
27°	
	fris

1) Ciel et Terre, **28**, 52, 1907.

Door een verwant psychologisch effekt werkt omgekeerd de temperatuur in op de schatting der windsterkte: een koude wind schijnt ons veel sterker dan een warme wind van gelijke snelheid[1].

Het is een belangwekkende vraag of de temperatuur van ons lichaam ook in merkbare mate afhangt van de straling der omgevende voorwerpen en van de straling die het zelf uitzendt. Wanneer we op een heldere winternacht buiten komen, krijgen we een sterk gevoel van koude. Ontstaat dit alleen door aanraking met de koude lucht, of ook door uitstraling[2] (zoals de aarde, het gras, de stenen door uitstraling afkoelen)? Ik verbeeld me werkelijk dat het voldoende is onder een afdak, onder een boom te gaan staan of een paraplu te openen, om de indruk te krijgen dat het gevoel van bittere koude minder wordt. Het is nog wel dezelfde lucht die langs ons strijkt, maar de uitstraling van ons lichaam wordt nu gecompenseerd door de straling van het dak boven ons hoofd.

Meet gedurende een etmaal de temperatuur *t* in 't vrije veld en schat terzelfdertijd de windsnelheid *v* (met wattenpluisje). Een grafische voorstelling van *t* als functie van *v* heet een *klimogram*; de vorm ervan leert ons onmiddellijk de subjectieve temperatuurindrukken kennen. Maak een dergelijk klimogram ook in het bos en vergelijk. - Vraag bij allerlei weersomstandigheden aan de leerlingen ener klasse hoe zwaar ze gekleed gaan, en onderzoek aldus hoe de verschillende afkoelingssnelheid in de kleding te voorschijn komt, en hoe groot de individuele verschillen zijn.[3]

87. De katathermometer.[4]

De subjektieve indruk van warmte of koude hing af van de snelheid waarmee de warmte van onze huid afgevoerd wordt. Die *afkoelingssnelheid* is een grootheid die allerlei klimaatelementen bevat, en bijvoorbeeld een maatstaf geeft voor de beoordeling van sanatoria enz. Nu kunnen wij dit afvoerproces in het klein nabootsen (hoewel onvolmaakt), door een thermometer tot even boven huidtemperatuur te verhitten en dan waar te nemen hoe snel hij tot even onder huidtemperatuur terugloopt (b.v van 38° tot 35°). Wil deze bepaling nauwkeurig genoeg zijn, dan is een bijzondere

1) Sitzungsber. Akad. Berlin, 283, 1913.
2) Vgl. Wells, Essay on Dew, blz. 250.
3) H. Grimm, Zs. f. angew. Meteor. **52**, 362, 1935.
4) Het oorspronkelijke stuk van Hill, Griffith, Flack staat in Philos. Trans. B **207**, 183, 1916. Zie verder o.a. Proc. R. Soc. B 1919 en 1922. - V. Conrad, Beitr. z. Geoph. **21**, 183, 1929. - M. Robitsch, Beitr. z. Geoph. **25**, 194, 1930. - H. Lehmann, Veröff. Geophys. Instit. Leipzig, **7**, 193, 1936.

vorm van instrument nodig, die een groot reservoir bezit en heel lang over de afkoeling doet: de *katathermometer*.

Wij zullen ons ermee vergenoegen, het beginsel van dit instrument te onderzoeken met behulp van een gewone alkoholthermometer, die trager is dan een kwikthermometer, en die we zo langzaam mogelijk kiezen (dus met groot reservoir). We zullen hem niet laten afkoelen van 38° tot 35°, maar we willen al bij 50° beginnen, en hem laten dalen tot het verschil met de luchttemperatuur op ⅔ van het aanvankelijke teruggebracht is; als het buiten dus 5° is, meten we dus de afkoelingssnelheid tussen 50° en 35° (want

$$\frac{35-5}{50-5}=\frac{30}{45}=\frac{2}{3}$$

). - We kiezen een windstille dag, voorzien ons van een thermosfles met heet water, en fietsen tot aan een rustige, rechte laan, die in de schaduw ligt.

De hoofdzaak is het onderzoek naar de invloed der windsnelheid. Dit geschiedt aldus: verwarm de thermometer in de thermosfles tot 65°, droog hem snel af en spring op de fiets. Een kameraad fietst naast u, u beproeft zo regelmatig mogelijk te trappen. Op het ogenblik dat de thermometer precies 50° aanwijst geeft u een schreeuw, en u begint de omwentelingen van uw voorwiel te tellen, dat voor dit doel een papieren klepper aan het ventiel gekregen heeft; terzelfdertijd heeft uw helper de tijd opgenomen. Zodra de thermometer gedaald is tot 30° weerklinkt uw tweede sein: de proef is afgelopen, aantal omwentelingen en tijd worden opgetekend. - Zo moeten enkele metingen worden uitgevoerd, bij zoveel verschillende snelheden als mogelijk is. Het is een hele toer, met constante snelheid te rijden, voldoende scherp op de thermometerkolom te letten .... en niet tegen een boom aan te komen! De bepaling van de tijd wordt veel gemakkelijker als men over een stophorloge beschikt, zoals er thans zo goedkoop in de handel zijn.

Nu worden de metingen tot een tabelletje verenigd. Elke omwenteling van het voorwiel komt ongeveer overeen met een afgelegde weg van 2 m. Hieruit volgt dan de snelheid v in m/sec. De afkoelingssnelheid H is omgekeerd evenredig met de vereiste tijd T, kan dus gelijk gesteld worden aan 1000/T bijvoorbeeld. Maak een grafische voorstelling van H = 1000/T tegen $\sqrt{v}$; een door mij verkregen voorbeeld is in het volgende tabelletje en in fig. 31 weergegeven.

Aantal omwentelingen voorwiel	**Afgelegde weg**	**Tijd T**	**Snelheid *v***	**√*v***	**1000/T**
29	58 m	39 sec.	1,50 m/sec.	1,22	25,6
39	78	35	2,23	1,49	28,5
49	98	30	3,27	1,81	33,3
50	100	29	3,45	1,86	34,5
58	116	25	4,63	2,15	40,0
70	140	26	5,39	2,32	38,5

De betrekking is vrijwel een rechte lijn; in onze eenheden wordt 1000/T = 9,0 + 13,5√*v*.

Dit is dus een bevestiging van de vorm der formule in § 86, al zijn de constanten enigszins anders; de invloed der vochtigheid zou moeilijker na te gaan zijn. Windsnelheden beneden 1 m/sec. beschouwen we niet, omdat de formule in dat geval

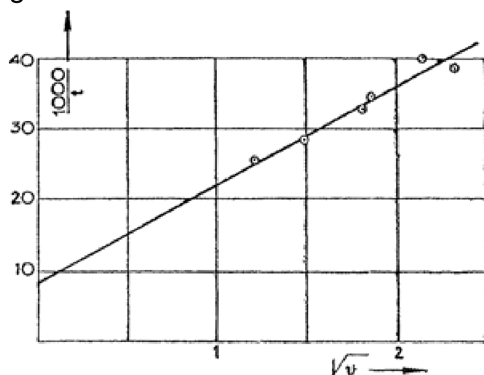


Fig. 31. De afkoelingssnelheid bij verschillende windsnelheden (bepaald met de fiets).

gewijzigd moet worden. Met ons aldus geijkt instrument kunnen we nu gemakkelijk windsnelheden meten. We kunnen de rol der straling onderzoeken, door de meting in de zon te herhalen; de afkoelingssnelheid is nu geringer en we kunnen de straling vergelijken met de convectie.

Vergelijk de afkoelingssnelheid in een bos en daarbuiten op verschillende tijden van dag en nacht. Kies vooral ook een mooie warme zomerdag, om het onderscheid duidelijk waar te nemen.

88. Brand.

Het doet vreemd aan, te bedenken, dat een aantal voorwerpen om ons heen voortdurend oxyderen, - dus eigenlijk verbranden - en dat het alleen door de lage temperatuur is dat de reactie langzaam en ongevaarlijk verloopt. Zodra echter de warmte-afvoer verhinderd wordt, kan de temperatuur oplopen, het proces wordt versneld, en het kan tot brand komen. Voorbeeld: de warmteontwikkeling in hopen steenkool, waarin het bijna altijd iets warmer is dan daarbuiten.

In een hoop vochtig hooi wordt de oxydatie versneld door een mikrobe, het Bacterium coli, dat warmte ontwikkelt en de temperatuur doet stijgen. Bereikt de temperatuur 40°, dan begint zich een ander organisme te ontwikkelen, het Bacterium calefactor, dat nog sneller warmte voortbrengt tot de temperatuur 70° en meer bereikt. - De boer vermijdt dit gevaarlijke ‘broeien’ door het hooi intijds uit te spreiden. Als er te lang gewacht is, en de temperatuur is al aanzienlijk opgelopen, kan het uitspreiden van het hooi en de toevoer van verse lucht al voldoende zijn om tot brand aanleiding te geven.

Zodra eenmaal de vlam verschijnt, is men verwonderd hoe allerlei voorwerpen branden, waarvan men dit niet mogelijk zou hebben geacht. Sommige soorten leisteen kan men aan een vlam aansteken, tengevolge van hun hoog koolstofgehalte. Bij het branden van een huis ziet men dikwijls de leien dakbedekking vuur vatten, en vindt men de stukken leisteen met gesmolten randen terug.

Bepaal gedurende een aantal dagen de temperatuur in hopen hooi en steenkool en vergelijk met de buitenlucht. De waargenomen verschillen zijn niet altijd gemakkelijk te verklaren; denk aan de langzame geleiding der warmte in vaste stoffen (§ 63), waardoor hoge of lage temperaturen der buitenlucht lang nawerken.

Wolkenland.

89. Krimpen en zwellen door vochtigheid of droogte.

Een boot die op het droge ligt vertoont reten en is niet waterdicht; die reten van het hout sluiten zich als hij een tijdje in 't water ligt.

Zo zijn er een aantal plantendelen die krimpen of zwellen door de vochtigheid. Andere krommen zich, omdat de binnen- en de buitenkant in *verschillende* mate water opnemen, dus niet even sterk zwellen. Maakt men er een schaaltje bij, dan kan men daarmee de vochtigheidsgraad ruw bepalen.

Ziehier enige voorbeelden.

a. Pluk een haverkorrel, omgeven door zijn kafjes, die in een lange naald eindigen. Prik hem op een plankje en plak aan het uiteinde der naald een lichte wijzer (strootje, hard papier), die de samentrekkingen of uitzettingen van de naald vergroot aanwijst (fig. 32*a*).

b. Dennekegels openen zich bij droogte en gaan in vochtige lucht dicht; ze hebben daartoe echter enkele uren nodig. Merk op hoe zij er buiten uitzien, bij verschillende weerstoestanden. Leg vochtige dennekegels bij de kachel!

c. Dergelijke krommingen vertonen de vruchtjes van de koekoeksbloem (Melandryum), het lis (Iris), enz.

d. Neem een halm oud, droog roggestro, splijt hem van de ene knoop tot de andere in reepjes van 1 mm breed, leg er 10 bij de kachel en kies die welke zich het duidelijkst kromt en zich bij beademen het best strekt. Klem hem in een gespleten houtstaafje en bevestig daar een schaaltje aan, om de stand bij verschillende vochtigheid te kunnen aflezen. Of hecht hem aan een plankje met een druppel zegellak.

e. De rijpe zaden van de reigersbek (Erodium cicutarium) zijn voorzien van een schroefvormig aanhangsel dat zich volgens

de vochtigheidstoestand meer of min afwikkelt; in een weinig water strekt het zich bijna geheel uit. Prik een gaatje in een stuk karton en druk daar het zaadje in (fig. 32*b*): het uiteinde van de schroef wijst dan door zijn stand de vochtigheidsgraad aan. Het toestelletje wordt nog gevoeliger als men met een zakmes voorzichtig de behaarde huid verwijdert. Met zulk een eenvoudig toestel, echter van een verwante zaadsoort gemaakt (Erodium moschatum), begon Boyle in 1666 een lange reeks stelselmatige waarnemingen van

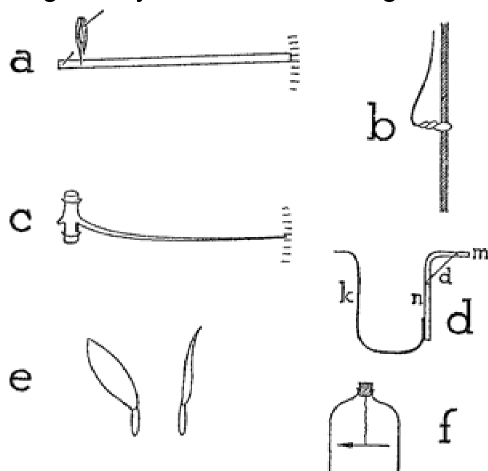


Fig. 32. Verschillende hygroscopische vormveranderingen van plantendelen.

de vochtigheidsgraad der lucht.[1)]

f. Snij een takkenkrans van een denneboompje af, 5 cm boven en 5 cm onder het vertakkingspunt; verwijder alle takken uitgezonderd één, haal er naalden en schors af. Bevestig nu het stukje stam op plankje, en ga door vergelijking met een hygrometer na hoe de stand van de zijtak met de vochtigheid verandert (fig. 32*c*). Het schijnt best te gaan met dood hout; de afwijking t.o. van de ware vochtigheidsgraad blijft binnen 10%.[2)]

g. Bevestig een vruchtsteeltje *nm* van het mos Funaria hygrometrica aan een koperdraadje *k* met behulp van kleefwas; door een gespannen draadje *d* wordt het steeltje rechthoekig gebogen (fig. 32*d*). Bij verandering in de vochtigheidsgraad der lucht, wringt zich het steeltje in *n*, en zal het uiteinde *m* als een wijzer draaien. - Hetzelfde gelukt met de vruchtnaalden van Stipa

1) H. Bohn, Physik. Apparate aus dem Schäffermuseum, nr. 196. (Berlin, 1902).
2) Physikalischer Arbeitsunterricht, blz. 25-26 (Leipzig, 1914). - Zs. f. Met. **2**, 1867.

pennata (het ‘veergras’ der bouquetten) en met andere grassen.[1] Omstreeks het midden der 16e eeuw zag Porta hoe de kinderen zich op die wijze met bepaalde soorten wilde haver vermaakten, en hij gebruikte ze als hygrometer.

h. De droge bloembladen van de immortellen zijn zeer gevoelig voor vochtigheid (fig. 32*e*). Geschikt is b.v. Acroclineum album of roseum. De gevoelige zone is eigenlijk zeer kort, maar men kan een wijzer aan het bloemblaadje bevestigen om de uitslag te vergroten. De beroemde meteoroloog Aitken heeft jaren lang een hiervan vervaardigde zakhygrometer gebruikt.[2]

i. De driedistel (Carlina vulgaris), vrijwel onze enige distelsoort met geelachtige, niet purperen bloemen, heeft omwindselblaadjes die bij droogte loodrecht van de stengel afstaan, en die zich in vochtige lucht beschermend om het bloemhoofdje buigen. De plant geldt algemeen als ‘weerprofeet’[3]. Nog beter bekend is het verschijnsel bij Carlina acaulis, de zilverdistel, die bij ons alleen als sierplant gekweekt voorkomt.

j. De stengel van de winde (Convolvulus) vertoont een grotere of kleinere torsie al naar de vochtigheid van de lucht.[4] Hang een stukje stengel in een glazen klok en bevestig er een wijzer aan (fig. 32*f*).

Al deze hygroskopische krommingen worden bepaald door *de betrekkelijke vochtigheidsgraad* der lucht, dit is de verhouding aanwezige hoeveelheid waterdamp / maxim. mogelijke hoev. waterdamp bij de heersende temperat.

90. De haarhygrometer.

Men vervaardigt een haarhygrometer van een lang, blond mensenhaar, dat men 24 uur in een flesje benzine brengt om het te ontvetten, en dan in lauwwarm water wast.

Bij overgang van ‘droog’ naar ‘verzadigd vochtig’ wordt zulk een haar ongeveer 2% langer. Men spant het op een plankje, slaat het onderste uiteinde om een katrolletje (stukje glazen buis om spijker), en spant het met een gewichtje; een wijzer, die de lengteveranderingen vergroot aanwijst, moet een tegengewichtje dragen, zodat hij geen neiging heeft om te vallen (fig. 33).

1) H. de Vries, Leerb. der Plantenphysiologie, blz. 150.
2) Met. Mag. **42**, 187, 1907. - Himmelswelt **2**, 122, 1890.
3) Naturwiss. **5**, 49, 1917.
4) C. Fitzhugh Talman, Sc. Americ. **104**, 599, 1911.

Deze oude haarhygrometer is nog altijd bij allerlei onderzoekingen een bruikbaar instrument om de betrekkelijke vochtigheid der lucht te bepalen. Hij is vrijwel onafhankelijk van de temperatuur, de barometerdruk, de windsnelheid, hij

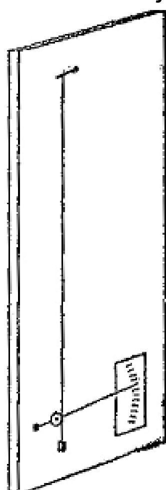


Fig. 33. Eenvoudige haarhygrometer.

geeft zelfs bij vorst nog bruikbare aanwijzingen. Daarentegen heeft hij het gebrek dat zijn nulpunt erg veranderlijk is; na lange droogte wijst hij merkbaar anders dan na lange vochtigheid. Daarom moet dikwijls gecontroleerd worden of de schaal nog deugt, hetgeen gebeuren kan door het haar even met een penseel te bevochtigen: de wijzer moet zich dan op 100 instellen.

IJk uw haarhygrometer door vergelijking met een psychrometer (§ 91), zowel binnenshuis als buitenshuis en bij verschillende weertoestanden. De verlenging van het haar is niet evenredig met de vochtigheidstoestand, gewoonlijk vindt men een verband dat niet veel van het volgende verschilt:

relatieve vochtigheid:	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
verlenging:	0	21	39	53	64	73	79	85	90,5	95	100

91. De psychrometer.

Maak uw vinger nat en houd hem omhoog! U voelt hoe hij koud wordt door de verdamping; aan de kant van waar de wind komt verdampt het water het snelst en is de afkoeling het duidelijkst. Het is het oude beproefde middel om zwakke luchtstromingen op te sporen.

Op ditzelfde beginsel heeft men nu een toestel gemaakt, de psychrometer, dat voor ons de eenvoudigste en nauwkeurigste vochtigheidsmeter is. Het zijn twee thermometers op een plankje, waarvan nagegaan is dat ze goed gelijk aanwijzen. Om het kwikreservoir van de éne, is een goed aanliggend lapje gebonden, bestaande uit een poreus, niet te fijn soort tulle, linnen of katoen, dat al eens gewassen is.

Om de vochtigheidsgraad te bepalen, bevochtigen we het lapje van ‘de natte thermometer’; het water gaat verdampen, en des te meer naarmate de lucht droger is; tengevolge hiervan begint die thermometer te dalen, tot hij weldra een bepaalde eindstand bereikt. Om nu uit de ‘droge temperatuur’ *d* en het

temperatuurverschil *v* de vochtigheidsgraad te berekenen, gebruiken we het formuletje[1]:

$$\text{relatieve vochtigheid} = 100 - \frac{330v}{18 + d}.$$

Wijzen dus de twee thermometers 20° en 16°, dan is de relatieve vochtigheid

$$100 - \frac{300 \,.\, 4}{18 + 20} = 100 - 35 = 65$$

.

Lees de psychrometer af in een besloten ruimte (kamer, broeikas, enz.). Beweeg hem daarna langzaam, zwaai hem tenslotte snel: de aflezing verandert en de daaruit berekende vochtigheidsgraad insgelijks; vooral bij zeer geringe windsnelheid (< 50 cm/sec) is deze faktor vrij belangrijk. Bij gebruik in besloten ruimten moet een psychrometer altijd een weinig bewogen worden.

Uit de psychrometeraflezing is ook rechtstreeks de spanning van de waterdamp S te bepalen, het snelst uit de formule: S = S_{nat} - A. temperatuurverschil.

S_{nat} is de maximumspanning van waterdamp in mm die bij de ‘natte temperatuur’ past, af te lezen uit de hier volgende tabel. De constante A is in de rustige lucht van een kamer 0,9, in licht bewogen lucht buiten 0,6, in snel bewogen lucht 0,5.

Merk op dat de natte thermometer meer dan eens 's nachts beneden nul aanwijst, terwijl hij toch met een vloeibaar waterlaagje bedekt blijft. Het is merkwaardig hoe dunne huidjes water en kleine druppeltjes soms sterk *onderkoeld* kunnen worden.

***Drukking van verzadigde waterdamp* (in mm kwik).**

-5°	3,0	5°	6,5	15°	12,8	25°	23,8
-4°	3,3	6°	7,0	16°	13,6	26°	25,2
-3°	3,6	7°	7,5	17°	14,5	27°	26,7
-2°	3,9	8°	8,0	18°	15,5	28°	28,3
-1°	4,2	9	8,6	19°	16,5	29°	30,0
0°	4,6	10°	9,2	20°	17,5	30°	31,8
1°	4,9	11°	9,8	21°	18,7	31°	33,7
2°	5,3	12°	10,5	22	19,8	32°	35,7
3°	5,7	13°	11,2	23°	21,1	33°	37,7
4°	6,1	14°	12,0	24°	22,4	34°	39,9

1) Quart. Journ. **54**, 287, 1928. - Moderne theoretische behandeling van het psychrometer-vraagstuk: Proc. Phys. Soc. London, **45**, 307, 1933.

92. Dauwpuntshygrometer.

Neem een busje van dun, glimmend metaal; een busje van scheerzeep is uitstekend geschikt. Doe er water in, en voeg kleine stukjes ijs toe, terwijl u met een thermometer voortdurend roert en de temperatuur afleest. Opeens beslaat het glanzend oppervlak met een duidelijk dof aanslag van uiterst kleine druppeltjes; lees onmiddellijk de temperatuur af! Dan laat u het busje een ogenblik staan, zodat het langzamerhand verwarmt, en schrijft op bij welke temperatuur het aanslag weer verdwijnt: dit punt is scherper te bepalen als men met een stukje karton langs het busje waait. Zo kan men een paar malen het aanslag doen verschijnen en weer doen verdwijnen; als de temperaturen niet veel meer dan 1° uit elkaar liggen, neemt men het gemiddelde als *dauwpunt*.

Stel dat we gemeten hebben: luchttemperatuur 14°; dauwpunt 8°. Dan vinden we in de tabel van § 91 de daarbij behorende spanningen:

grootst mogelijke spanning van waterdamp bij 14°	12,0 mm;
werkelijk aanwezige spanning	8,0 mm

De vochtigheidsgraad van de lucht is dus nu 8,0/12,0 = 67%.

93. Andere hygroskopen.

Er zijn een menigte toestellen uitgevonden om op allerlei manieren de vochtigheid van de lucht te schatten of te meten. Geen hunner is zo practisch en nauwkeurig als de psychrometer, en het is slechts voor de merkwaardigheid dat hier een paar voorbeelden genoemd worden.

a. Dompel een thermometer in geconcentreerd zwavelzuur, haal er hem uit en laat hem aan de lucht blootstaan (voorzichtig met het afdruppelende zuur!). Hij slorpt de vochtigheid uit de omgevende lucht op, en verhit zich daarbij sterk, want zwavelzuur ontwikkelt een grote hoeveelheid warmte als het zich met water verenigt. Hoe vochtiger de lucht, hoe sterker de temperatuurstijging. Men leest de hoogste waarde af die de thermometer bereikt, en zoekt het verband tussen temperatuurstijging en vochtigheidsgraad door in verschillende omstandigheden tegelijk een haarhygrometer of een psychrometer af te lezen. In een bepaald geval werd gevonden:[1)]

1) Arch. sc. phys. nat. **25**, 77, 1908.

vochtig-heids-graad:	32%	53%	66%	73%
tempe-ratuur-stijging:	11°	14°_3	16°_4	21°_0

Waarom is deze vochtigheidsmeter onnauwkeurig?

b. Dompel filtreerpapier in de volgende oplossing: 45 cm^3 water, 30 g $CoCl_3$ (kobaltchloride), 15 g NaCl (keukenzout), 7_5 g gummi arabicum, 4_5 g $CaCl_2$ (calciumchloride). Laat het papier drogen. Het kleurt zich nu rose als de lucht vochtig is, anders blauw. Dit is dezelfde stof die men veel gebruikt bij allerlei ‘weervoorspellers’. Natuurlijk *voorspelt* een hygroskoop het weer niet: hij deelt eenvoudig mee dat de lucht vochtiger of droger geworden is.

94. Waarnemingen over de vochtigheid van de lucht.

Deze waarnemingen doen we met de psychrometer.

Vergelijk 's winters de vochtigheidsgraad in een kamer met de vochtigheidsgraad buiten. Dikwijls vindt u binnenshuis een vochtigheidsgraad van 30% tot 40%, wat van dezelfde orde is als die van woestijnen in de zomer! (West-Toerkestan 45%, Arizona 35%, Ghadamès 27%).

Kies voor uw waarnemingen een mooie herfstdag met grote temperatuurwisseling en niet te veranderlijke windrichting. De bedoeling is, gedurende een heel etmaal zowel de betrekkelijke vochtigheid als de volstrekte vochtigheid te meten (deze laatste b.v. als spanning van de aanwezig waterdamp). Met de psychrometer vindt men beide gegevens (§ 91); met de haarhygrometer komt men er ook als men telkens ook de luchttemperatuur bepaalt. U zult vinden, dat de volstrekte vochtigheid in de loop van de dag vrijwel niet verandert. De betrekkelijke vochtigheid bereikt een minimum 's middags en een maximum 's nachts, haar verloop is precies het omgekeerde van dat der temperatuur. Dit is begrijpelijk, aangezien:

$$\text{betrekkelijke vochtigheid} = \frac{\text{volstrekte vochtigheid}}{\text{maximaal mogelijke vochtigheid bij de heersende } t}.$$

Daar de teller ongeveer constant is, en de noemer met *t* toe- en afneemt, schommelt de hele breuk omgekeerd met *t* op en neer.

Onderzoek de vochtigheid op verschillende hoogten tussen 't hoge gras. Op een windstille Julidag werd gevonden:[1)]

1) R. Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht (Vieweg, 1927).

2 cm hoog	96%
13 cm hoog	78%
100 cm hoog	57%.

Alweer een voorbeeld van sterke verschillen in mikroklimaat tussen punten die nog geen meter van elkaar verwijderd zijn (vgl. § 79)! Bij lange droogte kan men waarnemen hoe weilanden die gemaaid zijn snel verdorren, terwijl die met lang gras veel langer fris blijven; de tegenstelling tussen de bruine en groene percelen is zeer opvallend. De graslaag komt dus het watergehalte van de grond ten goede. Het is waar dat ze door haar groter oppervlak de verdamping versnelt, maar ze beschermt de grond afdoende tegen uitdrogen, zowel door het belemmeren van de luchtstromingen als door het laag houden van de temperatuur.

95. De verdamping.

Neem een gewoon bord (of een vlakke schaal, fotografiebak), doe er water in tot een bepaald merkteken, weeg nauwkeurig bord + water, en stel het buiten in de open lucht. Na een dag wordt het weer gewogen: het gewichtsverlies geeft direkt aan hoeveel er verdampt is. Nog eenvoudiger kan het door een blikken doosje op een brievenweger te plaatsen, en er water in te gieten tot de wijzer bij een bepaald getal staat. Dagelijks wordt de gewichtsvermindering afgelezen, en water bijgevuld tot het oorspronkelijke gewicht. - Natuurlijk mag het in de tussentijd niet regenen!

Heeft u bij benadering enig denkbeeld van het bedrag dat aldus gevonden wordt?

We kunnen nu nagaan hoe de verdamping toeneemt naarmate de lucht droger is, de temperatuur hoger, de wind sterker. Vergelijk de aanwijzingen van psychrometer en van verdampingsmeter bij verschillende weersomstandigheden! In een bepaald geval vond men dat er bij een windsterkte van 4 m per sekunde een laagje van 0,6 mm per uur verdampte; bij 7 m per sekunde een laagje van 1 mm per uur.

Bij deze proeven is altijd te bedenken, dat de verdamping wel toeneemt met het oppervlak, maar *niet evenredig met het oppervlak* is; men moet dus altijd de verdamping van éénzelfde schaal in verschillende omstandigheden vergelijken, niet verschillende schalen onderling.

Om de verdamping van een vijver of van een meer te bepalen,

laten we een half met water gevulde schaal in de vijver drijven; maak ze vast aan een staak en zorg dat er geen golven in spoelen. Het water in de schaal is nu als 't ware een deel van het vijveroppervlak geworden en verdampt *dan* natuurlijk even veel als de overige delen.

In het bos vinden we veel minder verdamping dan daarbuiten (ongeveer ½). Het teveel aan water dat aldus in het bos zou blijven verdwijnt, doordat het gebladerte van de bomen zo sterk verdampt.

Ook sneeuw verdampt. Een platte schaal met sneeuw wordt gewogen en tussen de sneeuwlaag ingegraven. Bijzonder belangwekkend wordt de proef beneden 0°, wanneer we zeker zijn dat het verdampen niet te wijten kan zijn aan smelten, gevolgd door verdampen van water. Blijkbaar gaat hier de vaste sneeuw rechtstreeks in gasvormige waterdamp over: 'sublimatie' dus. Deze soort verdamping is zeer duidelijk meetbaar, al is ze ook een langzaam proces. De verdamping van de sneeuw in het bos geschiedt nog veel trager dan daarbuiten, en dit is een van de redenen waarom hij in het bos zoveel langer blijft liggen, zelfs als de temperatuur beneden het vriespunt blijft.

96. De vorming van nevel en mist.

Op 't weiland zweven de witte nevels.
Een zwerver staart ernaar met schrik.
Bleek schijnt de maan in de avondure,
Maar licht gaat de luchtige dans door 't geboomte.
Het elfenmeisje met wuivend haar
Zweeft rank en ijl op 't bedauwde grasveld,
En door het geboomte gaat luchtig de dans;
- Ze lokken hem mee en hij moet wel volgen.

Heiberg, Elvershöj (1828).

Stralingsnevels vormen zich echter nooit onder 't geboomte!

We spreken van 'nevel' als voorwerpen op meer dan 1000 m afstand niet meer zichtbaar zijn, anders van 'mist'. Het onderscheid is niet zeer belangrijk, en zal in het volgende meestal niet streng volgehouden worden.

a. Bij regenachtig, mistig weer hangt de rook van de trein en van de fabrieksschoorstenen opvallend laag. De stofdeeltjes waaruit rook bestaat trekken de waterdamp aan en vormen 'condensatiekernen' die zich elk met een waterdruppeltje

omringen. Wellicht is het zwaveldioxyde (SO_2), dat bij de verbranding der steenkool ontstaat, en door zon en lucht in zwaveltrioxyde (SO_3) overgaat; het verbindt zich met water tot zwavelzuur. Hoe vochtiger de lucht, hoe groter de druppeltjes worden en hoe moeilijker ze met de luchtstromen meezweven. Zo komt het dat de rookpluimen al laag hangen *vóór de lucht verzadigd* is en vóór het gaat regenen: dit is een heel belangrijke en merkwaardige waarneming! Dergelijke nevels zijn *droge nevels* of *stadsnevels*. Vroeger heeft men gedacht dat de waterdamp om gewone stofjes condenseerde, of om luchtionen; we weten thans echter wel zeker dat de wateraantrekkende stofjes, omringd door hun watermantels, vrijwel de enige zijn die in de praktisch voorkomende omstandigheden als kernen voor de condensatie dienen. Wateraantrekkende deeltjes ontstaan niet alleen bij de verbranding, maar ook als de branding millioenen druppeltjes zeewater in de lucht verstuift die daar verdampen en elk een zoutkristalletje vormen; of als het ultraviolette zonlicht op zuurstof, stikstof en waterdamp van de lucht inwerkt. Veel van deze deeltjes zijn waarschijnlijk niet groter dan molekulen. Zijn eenmaal de druppeltjes gevormd, dan zullen zij de vaste stofdeeltjes vangen die in de lucht zweven, en zo zullen bijvoorbeeld de nevels onzer grote steden grijs of zwart zijn van de vele kooldeeltjes. Stadsnevels bestaan meestal uit grotere druppeltjes, en verdwijnen veel langzamer en moeilijker dan de landnevels, welke we nu zullen bespreken.

b. In de lente en in de herfst ontstaan 's avonds de welbekende *stralingsnevels* over onze vochtige weilanden.[1)] Het eerst wordt

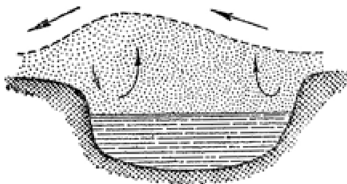


Fig. 34. Het opstijgen van stralingsnevel boven een sloot.

de nevel zichtbaar aan de kant van de zon als een dunne witte streep. Weldra stijgt witte damp uit de sloten op, waarvan het water langer zijn temperatuur behoudt dan de afkoelende aarde, en boven dewelke daardoor een opstijgende luchtstroom ontstaat; bij zwakke wind wordt de nevel als 't ware opgestuwd naar de kant waarheen de wind waait (fig. 34). Kort na zonsondergang

1) K. Braak, Tijdschr. Kon. Ned. Aardr. Gen. **39**, 595, 1922.

is het land met witte nevel bedekt, waarboven de ruggen van het vee uitsteken. Sommige stukken land vertonen de nevellaag nog helemaal niet, terwijl andere al wit zijn: verschillen in hoogte van enkele cm van het terrein of van het grondwaterpeil zijn voldoende om zulke opvallende verschillen te veroorzaken. In de loop van de nacht kan de nevellaag 2 m tot 5 m, zelden 10 m hoog worden; tevens wordt de nevel meestal ook dichter en maakt het gras en de planten nat, de druppeltjes zijn minder regelmatig en mooi en bevochtigen de grasssprietjes sterker.
Bij deze stralingsnevels is het bijzonder duidelijk dat de dampkring niet afkoelt doordat de wind koude lucht van elders aanvoert, maar doordat de afkoeling ter plaatse ontstaat. De grond wordt kouder door de nachtelijke uitstraling, en het luchtlaagje dat daar rechtstreeks mee in aanraking is koelt mee af tot de condensatie begint (§ 92). Het is duidelijk dat de afkoeling zich veel langzamer aan de hoger gelegen luchtlagen meedeelt dan de verwarming van de grond door de ochtendzon; daarenboven zal het nevellaagje, als het eenmaal ontstaan is, tegen verdere uitstraling en afkoeling beschermen. Om beide redenen is het dat de nevellaag betrekkelijk zo dun blijft.
Dikkere stralingsnevels ontstaan soms, als op enkele warme, vochtige dagen een heldere nacht volgt. Of als het in de winter bij hoge barometerdruk dagen achtereen helder is, en de temperatuur van de onderste lagen sterk door straling afkoelt, terwijl het hoger in de dampkring warm is.

c. *Riviernevels* ontstaan in de herfstnacht, en zijn 's ochtends zichtbaar als witte wolkjes, uitgerafeld door de zachte wind, die over kanalen en vijvers zweven. Ze vormen zich, doordat het water 's nachts slechts weinig afkoelt en weldra warmer is dan de lucht die over het land is gestreken.

d. Op grote schaal vormen zich *mengingsnevels* als vochtige warme lucht met koude lucht gemengd wordt. Dat is het geval in de winter, als een gebied van hoge druk boven het Oosten van Europa ligt, een gebied van lage druk boven West-Europa; in het eerste is de lucht koud, in het tweede warm en vochtig. Tussen de twee gebieden heerst Zuidelijke of Zuid-Oostelijke wind, en worden de twee luchtsoorten gemengd. Dan treedt geregeld nevel op, die echter verdreven wordt zodra de wind te hard gaat waaien.

e. *Zeenevel* ontstaat nabij de kust, door het temperatuurverschil tussen land en zee, en de menging die bij zwakke wind vanzelf optreedt. In een zeer uitgesproken geval van die aard was de temperatuur van de zee + 8°, die van de lucht - 7°. - Een bijzonder geval is ‘het dampen der zee’ dat boven de warme Golfstroom dikwijls optreedt.[1)]

f. Een bijzonder soort ochtendnevel ontstaat één tot twee uur na zonsopgang, doordat de bedauwde aarde tengevolge van de bestraling veel waterdamp afgeeft; de lucht daarboven is nog koud, en bij menging van de twee luchtsoorten condenseert de nevel.[2)] Soms kan men zeer mooi zien hoe alleen de zonbeschenen helling van een spoorwegdijk met nevel bedekt is, terwijl de schaduwzijde vrij van nevel is.

97. Waarnemingen betreffende nevel.

Als de nevel uit zeer kleine druppeltjes bestaat, bevochtigt hij de omgevende vaste voorwerpen maar weinig: de oppervlaktespanning der druppeltjes is zó groot, dat ze veerkrachtig terugspringen. Als de druppeltjes groter zijn, slaan ze op struiken, bladeren, twijgen, enz. neer en bevochtigen die.

Bij vochtige nevel kan het voorkomen dat stenen, houten stoelen droog blijven, terwijl draden en haren integendeel vochtig worden. Men onderstelt dat er nog veel diffuus hemellicht door de nevel dringt, zodat de voorwerpen boven de luchttemperatuur verwarmd worden, en druppeltjes die er op neerslaan snel verdampen; zeer kleine of dunne voorwerpen kunnen echter door de straling maar weinig in temperatuur stijgen, want ze verliezen hun warmte naarmate die wordt toegevoerd. Dit kan een van de redenen zijn waarom men bij mist de druppeltjes zo overvloedig ziet neerslaan op ons haar, op bont en veren, sluiers enz.

Dikwijls verzamelt zich de nevel in gelokaliseerde massa's, echte ‘mistballen’, die soms verrassend snel op komen zetten, en na enige tijd weer even snel verdwijnen; telkens als we in de nevel komen wordt het donkerder, kouder, vochtiger. Dit verschijnsel doet zich vooral 's winters voor aan mondingen van grote rivieren en op zee. In sommige gevallen is de oorsprong te zoeken in fabrieksrook van grote steden; soms heeft de nevel een eigenaardige geur die zijn ontstaanswijze verraadt.

1) Ann. Hydr. **28**, 118, 1900.
2) Met. Zs. **35**, 184, 1918.

Een plein, omringd door een schutting; bomen er omheen. Op een avond in Februari had zich avondnevel over het plein gevormd, tot de hoogte van de schutting. En nu stroomde de koude, met nevel beladen lucht over de schutting in een paraboolvormige straal, precies als water dat uit een overvol vat zou uitstromen![1)]

Nevel op zee schijnt soms een merkbaar zoutgehalte te vertonen. Kies voor deze proef een dag waarop de zee kalm is, en er dus geen schuim van de golven door de wind meegenomen kan worden. Vang de neveldruppeltjes op een glanzend metalen beker op; na ongeveer een uur is hij met kleine druppels bedekt. Doe warm water in de beker: de druppeltjes verdampen en laten een witachtig aanslag dat niet veel anders dan zout kan zijn. Dit zou bevestigen, dat de neveldruppeltjes zich inderdaad vormen om mikroskopische zoutkristalletjes die altijd boven de zee zweven (§ 96).

98. Nevelvorming aan hopen sneeuw of hagel.

Een merkwaardig geval, opgetreden na zware sneeuwval waarop plotselinge dooi volgde. De sneeuw was in grote hopen bijeengeveegd, en nu zag men hoe al die hopen ‘rookten’ in de wind! Boven elke hoop sneeuw hing een neveltje, dat zich een eindje in de windrichting uitstrekte als een damppluimpje.

Verklaring: de warme Zuid-Westenwind, bijna verzadigd met waterdamp, koelt af als hij over de koude sneeuw strijkt en er ontstaat condensatie.

Een dergelijk geval kon men waarnemen na de onweersbui die in de namiddag van 28 Mei 1935 over Bilthoven loskwam, en plaatselijk hevige hagelneerslag veroorzaakte. Het was een genot, tegen de avond rond te fietsen door het hagelgebied, en overal waar de witte korrels nog opgehoopt lagen, nevel tegen de achtergrond der donkere bossen te zien opstijgen, zacht door de wind meegevoerd in scherp gelokaliseerde massa's van slechts weinige meters hoogte. In de tussenruimten was het landschap helder en voelde de lucht lauwwarm aan. Geen wonder dat die met waterdamp verzadigde lucht nevels vormde zodra ze streek over de hagelgebieden, waar men aan de kilheid kon voelen hoe sterk ze afkoelde.

1) Das Wetter, **19**, 46, 1902.

99. Wolken schetsen en fotograferen.[1)]

Ik ben het kind van Water en Wind,
'k Werd gewiegd aan het hemelverschiet.
Ik dring ongeschonden door zeeën, door gronden,
'k Verander, toch sterf ik niet.

P.B. Shelley, The Cloud.

Schetsen van wolken maakt men met wit krijt op dik blauw papier of blauw karton. Goethe heeft er op die manier een aantal

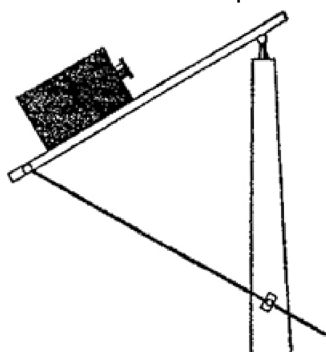


Fig. 35. Eenvoudig statief voor wolkencamera.

vervaardigd. Zulk een verzameling geeft een groot genot en draagt een zeer persoonlijk karakter.

Het fotograferen is een boeiend werk dat veel te weinig beoefend wordt, en dat rechtstreeks nut kan hebben voor de wetenschap. Alle camera's zijn bruikbaar, ook zulke met kleine opening; grotehoek-lenzen zijn te verkiezen. Kleine camera's bevestigt men op een statief met kogelgewricht, zodat ze in elke willekeurige stand gericht kunnen worden, grotere camera's stelt men voor hetzelfde doel op een speciaal statief (fig. 35). In de laatste tijd is men de z.g.n. kleincamera's veel gaan gebruiken voor reeksopnamen, die de achtereenvolgende vervormingen van een wolk vertonen. De blauwe lucht werkt op de platen haast even sterk in als de witte wolken; om dit te vermijden en meer tegenstellingen te krijgen, gebruikt men orthochromatische platen, met een geelfilter dat de belichtingstijd 6 of 7 maal verlengt (b.v. Wratten K_1); voor ijlere wolken of bij zonsondergang neemt men panchromatische platen met diepgeel of rood filter (Wratten K_2). Voor onweerslucht met grijze achtergrond helpen kleurgevoelige platen niet en neemt men liever wat langzame gewone platen. Alle platen moeten voorzien zijn van een antihalo-laag; als men ze krijgen kan neme men dubbel gegoten

1) Over wolken bestaat een zeer grote litteratuur. Prachtig is de ‘Atlas international des Nuages et Etats du Ciel’ (Parijs 1932), met 174 platen; hiervan bestaat ook een verkorte uitgave. - G.A. Clarke, Clouds (London 1920). - C.J.P. Cave, Clouds and Weather Phenomena (Cambridge 1926). - Van Everdingen, Quart Journ. **51**, 1925, ook in Hemel en Dampkring **23**, 277, 1925. R. Süring, Die Wolken (Leipzig, 1936). - W.J. Humphreys, Fogs and Clouds, (Philadelphia 1926). - Over wolkenfotographie: M.W.R. **48**, 453-458, 1920.

platen. Diaphragmeer, belicht ongeveer ¼ van de belichtingstijd die voor een open landschap gekozen zou worden; voorbeeld: witte wolken in de zon, F/16, Cramer Iso met geelfilter, ⅕ tot 1/10 sec; grijze wolken 's zomers, F/16, Cramer Iso zonder filter, 1/50 sec.

Bescherm de lens tegen zijdelings invallend licht dat niet tot de beeldvorming bijdraagt, vooral tegen zonlicht!

Ontwikkel contrastrijke opnamen, b.v. felverlichte cumuli, met zeer verdunde ontwikkelaar zonder broomkali, b.v. met rodinal of glycine. Voor tere cirri of schaapjeswolken: metol-hydrochinon-ontwikkelaar (met broomkali).

IJle cirruswolkjes worden het duidelijkst als men ze in een polariserende spiegel van donker glas fotografeert; hiertoe kan men een spiegelglasplaat gebruiken waarvan men de achterzijde met asfaltlak bekleedt om dubbele beelden te vermijden (Vgl. I, § 181).

Beproef eens *stereoskopische wolkenfoto's* to maken![1] Het eenvoudigst geschiedt dit door een camera te richten loodrecht op de richting van waar de wolken komen, en zo snel mogelijk na elkaar twee opnamen te maken (tussenruimte: 5 tot 20 sekunden). Met een stereoskopische camera gaat dit erg praktisch, door eerst de dop voor het ene, dan voor het andere objectief te zetten; maak eerst de opname aan de kant van waar de wind komt, dan hoeven de foto's niet omgewisseld te worden voor het stereoskopisch bekijken. - Deze methode steunt op de overweging, dat de beweging der voorbijtrekkende wolken het vergezicht op dezelfde manier wijzigt als wanneer de fotograaf zijn toestel een eind ver verplaatst had. Men bereikt wondermooie effekten, het fantastische wolkenland ligt voor ons met al zijn diepten en verten. Het gevaar is echter dat de wolken ondertussen niet in dezelfde stand ten opzichte van elkaar gebleven zijn, en dat sommige van de diepte-effekten niet geheel met de werkelijkheid overeenkomen.

De betrouwbaarste stereoskopische opnamen verkrijgt de vakman, door twee camera's van zelfde brandpuntsafstand op 100 tot 500 m van elkaar op te stellen, en naar hetzelfde deel van de hemel te richten. De opnamen geschieden nauwkeurig op het ogenblik dat een sein gegeven wordt. Uit dergelijke foto's wordt de hoogte der verschillende soorten wolken bepaald.

1) C.J.P. Cave, M.W.R. **48**, 458, 1920. - L.E.W. van Albada, Hemel en Dampkring, **25**, 1927 en **26**, 1928.

100. De wolkenspiegel.

De richting waarvandaan de wolken aankomen is niet altijd gemakkelijk te bepalen. We zoeken naar welke windstreek we moeten kijken om ze *vertikaal* te zien opstijgen; het nauwkeurigst gaat dit, door ons achter een paal te stellen, zó dat we een punt van de wolk precies langs de paal zien lopen.

Een andere manier is, dat men zich zó stelt dat de top van



Fig. 36. Waarnemingen met een eenvoudige wolkenspiegel.

de paal met de wolk schijnt samen te vallen, en dan over het terrein loopt, zorgend dat de top voortdurend de wolk blijft bedekken. De baan volgens dewelke we lopen is dan evenwijdig aan de wolkenbaan. (Waarom?)

Maar het wordt toch maar ‘echt’ wanneer we *de wolkenspiegel* gaan gebruiken! Het is al een genot op zichzelf om de wolkentaferelen in een spiegel te bekijken. Waarom eigenlijk, ziet het spiegelbeeld er dan niet uit zoals het voorwerp zelf? Wellicht hindert ons anders de geweldige stroom van licht die van heel het hemelgewelf in ons oog dringt, terwijl de spiegel ons de wolken

in een veel donkerder omlijsting vertoont. Zelfs in een verzilverde tuinbal of de bolle achterkant van een vernikkelde fietslantaarn zien we ijle wolkenribbels en allerlei bijzonderheden die anders veel minder opvallen.

Het voornaamste nut van de wolkenspiegel is echter de bepaling van *de snelheid* der wolken. - Neem een willekeurig stukje spiegel, een zakspiegeltje of een stukje dun 'spioenglas' van 7 × 7

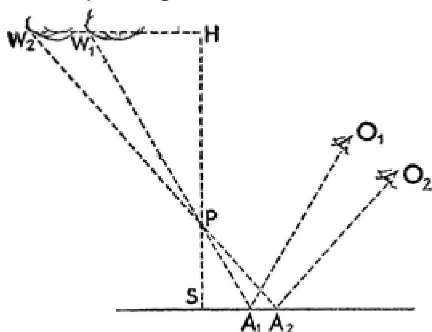


Fig. 37. Theorie van de wolkenspiegel.

cm, en leg het op het vensterkozijn of buiten in de tuin op een tafeltje dat goed waterpas staat (fig. 36). Plaats vóór u een fles, door de kurk waarvan een puntig staafje vooruitsteekt, bijvoorbeeld een breinaald P. Ga voor het tafeltje zitten en houd uw oog zó, dat u een duidelijk kenbaar punt W van de wolk in het spiegeltje teruggekaatst ziet; verschuif de fles tot het spiegelbeeld van de breinaaldpunt met het spiegelbeeld van de wolk W samenvalt. Als de wolk beweegt kunt u ze steeds op het spiegelbeeld van P houden door uw oog langzaam te verschuiven. Maak een inktstipje A op het spiegeltje bij de plaats waar de wolk nu is, en begin dan onmiddellijk sekunden te tellen; het horloge, dat u op de tafel legt, geeft u de juiste rhythmus aan.

Volg ondertussen de wolk met het oog en zet na 30 sekunden een tweede stipje A_2 op het spiegeltje, ook ditmaal zó dat het tegelijk het beeld van de wolk en van de breinaaldpunt bedekt.

Daarmee is de waarneming klaar. Men ziet uit figuur 37 dat W_1W_2 / A_1W_2 = PH / PS.

Dus: door de wolk afgelegde

$$\text{weg} = \text{afstand der stippen} \times \frac{\text{hoogte der wolk}}{\text{hoogte breinaald boven spiegel}}$$

De hoogte van de breinaald en de afstand van de stippen zijn met een latje te meten. De hoogte der wolk wordt uit de wolkenvormen geschat (§ 109). Dus is de door de wolk afgelegde weg en haar snelheid te berekenen.

Voorbeeld. - Voor een altocumuluswolk werd gevonden: A_1A_2 = 1,5 cm in 30 sekunden. We schatten de wolk 4000 m hoog, en vinden dat de punt der breinaald zich 25 cm boven de tafel bevindt. De wolk heeft dus afgelegd: 0,015 × 4000/0,25 = = 240 m in 30 sekunden, of 8 m/sek.

De *richting* waarin de wolken bewegen vindt men onmiddellijk, door een latje te leggen langs de stipjes A_1A_2, en de richting daarvan te schatten of met een kompasje te bepalen.

De methode is ook *op een schip* te

Fig. 38. Eenvoudige wolkenspiegel, van een sigarenkistje vervaardigd.

gebruiken als de zee enigszins rustig is. Men tekent dan verscheidene stipjes na elkaar en trekt er een gemiddelde lijn door. Verder heeft men er de snelheid van het schip nog bij op te tellen met behulp van het parallelogram der snelheden.

Zoals men ziet, is het aardige van de wolkenspiegel, dat generlei herleiding nodig is voor de hoek waaronder men op de wolkenlaag kijkt. Geef er u rekenschap van dat het instrument dit vanzelf in rekening brengt.

Ziehier een andere eenvoudige wolkenspiegel (fig. 38).[1] - Neem een sigarenkistje van bijvoorbeeld 4 cm hoogte. Maak het deksel open, leg op de bodem een spiegel en boven op het kistje een ruitje (waardeloze fotografische plaat), richt de kanten van het kistje naar de vier windstreken.

Op het ruitje zet u een inktstipje P, waarvan het spiegelbeeld P' als viseerstip dient. Op het ogenblik dat u een wolk weerspiegeld ziet in de richting van P' zet u een inktstipje in A_1, dat P' en de wolk bedekt; na 1 minuut is de wolk verschoven en zet u het stipje A_2, dat *thans* P' en de wolk bedekt. Men ziet onmiddellijk dat $W_1W_2 = W'_1W'_2 = A_1A_2 \cdot h/PP'$. Voor wolken

1) Météor. **4**, 315, 1928. - Nog een andere constructie in Met. Zs. **39**, 54, 1922.

van 1000 m hoog is de snelheid per minuut 1000/0,08 A_1A_2 = 12500 A_1A_2, en de snelheid per sekunde: 208 A_1A_2. De lijn A_1A_2 geeft meteen de richting aan waarin de wolken drijven.

Met de wolkenspiegel kunnen we dus nagaan hoe snel de wolken van verschillende hoogte bewegen, dus de windsnelheid in allerlei lagen van de dampkring bepalen. Belangwekkend zijn onze bevindingen vooral voor de hoge wolken. Het blijkt dat de Westenwind, die hier beneden vrij veel voorkomt, in de hoge lagen meer en meer overheerst. Van de snelheden krijgt men een denkbeeld uit volgend tabelletje:

0—2	2—4	4—6	6—8	8—10	10—12	km
9	13	18	23	31	42	m/sek

In de cirruslaag heerst dus gewoonlijk een windsterkte die we hier 'orkaan' zouden noemen; er komen echter ook snelheden van 70 tot 100 m/sek. voor!

Bij nauwkeurig werken met de wolkenspiegel is men verbaasd hoe volmaakt evenwijdig alle punten van een wolk bewegen. Kleine, geleidelijke veranderingen die het oog ziet gebeuren zijn zonder belang; voor nauwkeurig werk aan lage wolken neemt men een 5-tal punten waar en middelt. Vergelijkt men nu echter wolken op grote afstand van elkaar, die toch klaarblijkelijk tot éénzelfde laag behoren, dan vindt men verrassend grote verschillen.[1)] Stel dat de wolken uit het Noorden aankomen en men naar O of W kijkt; cirri en altocumuli op 25° hoogte boven de gezichteinder vertonen dan soms verschillen van 15° en 20° in de bewegingsrichting! Dit wijst er waarschijnlijk op, dat de wolken niet nauwkeurig in een horizontaal vlak bewegen, maar een weinig *stijgen* of *dalen*. Als men op 45° hoogte naar Oost en op 45° hoogte naar West waarneemt, is het verschil der schijnbare windrichtingen gelijk aan tweemaal de helling van de wolkenbaan met het horizontale vlak.[2)] Bij deze metingen moet men er zich altijd van vergewissen dat men wolken van éénzelfde laag met elkaar vergelijkt; daarom is het nuttig, niet alleen de richting maar telkens ook de snelheid der beweging te bepalen:

1) L. Besson, Ann. soc. Météor. France, **50**, 1902.
2) In 't algemeen is tg i = tg ϵ. tg h, waarbij i de helling der baan, ϵ de afwijking van de gemiddelde richting, h de hoogte der wolken in hoekmaat voorstellen. Bij nauwkeurige meting vond Besson dat de metingen op 45° en op 25° hoogte niet geheel in overeenstemming met elkaar zijn. Wellicht is dit te verklaren door plaatselijke eigenaardigheden van de luchtstromen boven Parijs.

deze laatste moet voor wolken van eenzelfde laag ongeveer constant zijn.

Ik heb wel eens de indruk gekregen dat het gebrek aan evenwijdigheid in de wolkenbanen reeds zonder enige meting waar te nemen is, eenvoudig door het aandachtig bekijken van de wolken. Men ziet soms de wolken in hun vlucht uiteenwijken of naar elkaar toekomen, zodat men rechtstreeks de indruk krijgt van een daling of stijging. Daar echter gezichtsbedrog hierbij een rol kan spelen, is een werkelijke meting onontbeerlijk.

Dat de wolkenlagen meestal iets hellen is met zekerheid gebleken uit nauwkeurige fotogrammetrische opnamen; men vindt hoeken van de orde van 5°. Het is belangwekkend, dat dergelijke hellingen ook in de bewegingsrichting te voorschijn komen.

101. Bepaling van de hoogte der wolken uit hun kleur bij de schemering.[1)]

'Tot dit onderzoek werd ik gebracht door de herhaalde waarneming, dat de wolkjes welke men dikwijls in een heldere hemel hier en daar zweven ziet, zich bij dalende avondzon en na zonsondergang een tijd lang purper kleuren, om na een kwartier of een half uur die kleur tamelijk snel te verliezen en opnieuw te verbleken. Nu leerden mij redenering en dagelijkse ervaring, dat de zonnestralen het vroegst verdwijnen uit de dalen, het laatst van de hoogten; eerst dus van velden en weiden, daarna van de daken der gebouwen, nog later van de toppen der bergen; maar 't laatst van al worden de wolken verduisterd, en die aan de oosterhemel vóór die aan de westerhemel. Ik aarzelde dus niet te besluiten, dat deze roodkleuring der wolken uitsluitend ontstaat door terugkaatsing van de zonnestralen waardoor zij bestraald worden; en dat zij dus moet verdwijnen wanneer de Zon zich achter de welving der Aarde verbergt. Dit vooropgesteld, begon ik mij af te vragen of we uit het ogenblik van het verdwijnen dier rode kleur de hoogte der wolken niet zouden kunnen naspeuren.'

Jac. Bernoulli, Acta Erudit. **7**, 98, 1688.

Beschouw eerst een wolk W, loodrecht boven het hoofd van den waarnemer O (fig. 39); de waarnemer zag de Zon ondergaan in Z_1, de wolk zag de Zon iets later ondergaan in Z_2. Noem α de hoek over dewelke de Zon inmiddels gedaald is onder de

1) Arago, C.R. **11**, 324, 1840. - Besson, Rev. scientif. **48**, 58, 1891.

gezichteinder van den waarnemer O. Is r de straal der aarde, dan is CW = r sec α en OW = r (sec α - 1); voor kleine hoeken wordt

$$\mathrm{OW} = r\left(\frac{1}{1-\frac{1}{2}\alpha^2} - 1\right) = \tfrac{1}{2}\alpha^2 r$$

Beschouw nu een willekeurige wolk V in het vertikale vlak door ons oog O en de Zon. In driehoek VOW is

$$\frac{\mathrm{OW}}{\sin\,(90^\circ + \alpha - z)} = \frac{\mathrm{OV}}{\sin\,(90^\circ - \alpha)};$$

dus

$$\mathrm{OV} = r(\sec\alpha - 1)\,\frac{\cos\alpha}{\cos\,(\alpha - z)}$$

. Tenslotte geldt ongeveer:

$$\mathrm{VD} = \mathrm{VO}\cos z = r(\sec\alpha - 1)\,\frac{\cos\alpha - \cos z}{\cos(\alpha - z)} = r\,\frac{\sec\alpha - 1}{1 + \mathrm{tg}\,z\,\mathrm{tg}\,\alpha}.$$

Men maakt geen grote fout als men de daling van de Zon onder de horizon op onze breedten op 8° of 0,14 rad per uur

Fig. 39. Bepaling van de hoogte ener wolk uit de schemeringskleur.

schat. Wolkjes boven ons hoofd die 20 min. na zonsondergang nog verlicht worden hebben dus een hoogte van $\frac{1}{2}\alpha^2 r$ = 6370 km × × 0,00108 = 6,8 km. De schatting van het juiste ogenblik waarop de purperkleur van de wolkjes verdwijnt is moeilijk, beter gelukt het de plaats aan de hemel aan te wijzen tot waar op een gegeven ogenblik de grens van de purperkleur gekomen is. Bernoulli bepaalde de hoogte van dat punt met een quadrant. Een ruwe schatting is echter al voldoende (§ 218), te meer omdat de theorie de straalkromming verwaarloost.[1)]

1) Nauwkeurige berekening met inachtneming van de straalkromming: Met. Zs. **10**, 82, 1893; **18**, 162, 1901.

Ter vergemakkelijking diene het volgende, voor straalkromming verbeterde tabelletje, dat de hoogte der wolken rechtstreeks in meters aangeeft; *z* is positief gerekend naar het Westen, negatief naar het Oosten.

a **=**	**1°,5**	**2°**	**2°,5**	**3°**	**3°,5**	**hoek van de zon onder gezicht-einder**
90°-*z*						
160°	2000	3700	6000	8800	12400	
120°	1900	3500	5400	8200	10900	
80°	1900	3400	5400	7700	10500	
40°	1900	3300	5200	7400	9900	
10°	1700	3000	4600	6300	8200	
hoogte der wolk boven de kim						

De purperkleuring der wolken verraadt onmiddellijk of twee wolken tot dezelfde laag behoren of niet; beproef u uit de achtereenvolgende kleurverschijnselen voor te stellen hoe de opbouw van het wolkenstelsel is.

102. Bepaling van de hoogte der wolken uit hun schaduw.

De hier beschreven methoden zijn alleen toe te passen bij wolken die een scherpe, goed herkenbare schaduw werpen.

1. *Volgens Lambert*. - Uit de vergelijking voor de wolkenspiegel (§ 100):

$$\text{snelheid der wolk} = \text{snelheid der inktstip} \cdot \frac{\text{hoogte der wolk}}{\text{hoogte breinaald boven spiegel}}$$

zouden we de hoogte der wolk kunnen afleiden, indien we de ware snelheid der wolk kenden. Maar deze snelheid kunnen we bepalen, als de wolk een duidelijke schaduw werpt, die men over 't vlakke land ziet lopen. Bij zonnig, opklarend weer en van een hoog gelegen waarnemingspunt is dit soms een prachtig gezicht! Let op in welke richting de wolkschaduwen bewegen, bepaal de tijd die ze nodig hebben om een gegeven afstand in het landschap te doorlopen, en meet die afstand. De ware snelheid is nu bekend, en een vergelijkende meting met de wolkenspiegel geeft de hoogte der wolk, volgens de reeds genoemde vergelijking.

2. *Volgens Brandes* (fig. 40). - Keer u naar de zon en zoek een wolk W in een vertikaal vlak door uw oog O en de Zon Z. Schat uw afstand *b* tot aan de wolkenschaduw W', de hoogtehoek α in graden van de wolk boven de gezichteinder, en de

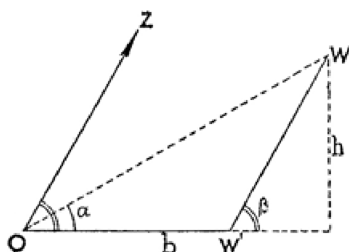


Fig. 40. Bepaling van de hoogte ener wolk uit de schaduw; de wolk bevindt zich in het vertikale vlak door de zon.

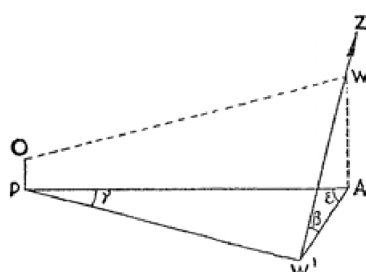


Fig. 41. Bepaling van de hoogte ener wolk uit de schaduw; algemeen geval.

hoogtehoek β van de zon. Men vindt dan gemakkelijk voor de hoogte der wolk:

$$h = \frac{\sin \alpha \, . \, \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)} b.$$

3. *Volgens Feussner* (fig. 41).[1] - Deze methode kan toegepast worden op een willekeurige wolk. Van uit het waarnemingspunt O bepaalt men de plaats W' waar men zich op een gegeven ogenblik de schaduw ziet aftekenen; het azimuth ϵ van de wolk W ten opzichte van de Zon Z (vergelijk de schaduw van een schietlood met de richting der wolk); en de zonshoogte β. Uit de figuur blijkt dat: AW' / sin γ = PW' / sin ϵ. Dus WA = W'A tg β = PW'sin γ /sin ϵ tg β.

Volgens Feussner bereikt men met de eenvoudigste middelen een nauwkeurigheid van 1 tot 6%. Natuurlijk is enige oefening in het schatten van hoeken vereist (§ 218).

1) Ann. d. Phys. **144**, 456, 1872. - Ciel et Terre, **18**, 493, 1897.

103. De bepaling van de hoogte der wolken uit hun parallax.

Als er bij blauwe lucht een scherp afgetekende, zware wolkenbank aan de gezichteinder komt opzetten, belt u telephonisch een vriend op, die in die richting een kilometer of vier van u af woont. 'Hallo ouwe jongen! Goede gelegenheid om wolkenhoogten te bepalen! Kijk eens uit het venster, keer je recht naar de aankomende wolkenbank en schat haar hoogte boven de kim. Niet te hoog schatten, precies doen zoals in "de Natuurkunde van 't vrije Veld" staat, § 218! Vijf en dertig graden? Dank je wel; ik zal je morgen wel berichten hoe hoog de laag was!'

U heeft van uw kant ongeveer op 't zelfde ogenblik de hoek

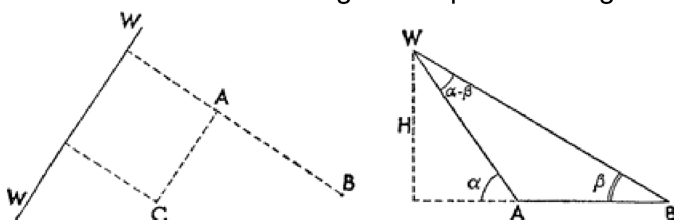


Fig. 42. Bepaling van de hoogte ener wolkenkolom WW, die van de punten A en B uit worden waargenomen

boven de kim geschat. Op de kaart tekenen we de richting van de wolkenbank WW (fig. 42); de waarnemer C is er dichter bij dan B, 't verschil is AB. Noem α en β de hoeken die de twee waarnemers geschat hebben.

In driehoek WAB is

$$\frac{WA}{WB} = \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha - \beta)}$$

Dus

$$H = W \sin \alpha = AB \frac{\sin \alpha \, . \, \sin \beta}{\sin(\alpha - \beta)} = \frac{CAB}{\operatorname{cotg} \beta - \operatorname{cotg} \alpha}$$

Als men verschillende waarnemingen doet, telkens met tussenruimten van enige minuten, krijgt men waarden voor H die niet veel uit elkaar mogen liggen.

Volgens dit beginsel is het dat alle wetenschappelijke bepalingen van de wolkenhoogte geschieden; alleen worden de hoeken nauwkeurig met een theodoliet gemeten of nog beter fotogrammetrisch bepaald. En op dergelijke wijze vindt de sterrekundige de afstand van de Maan of van de sterren.

104. De hoogte der wolken bepaald uit waarnemingen op een trein of auto.[1)]

De volgende waarneming kan men doen als er tegelijk hoge en lage wolken te zien zijn, en hun relatieve beweging niet zeer groot is. Men stapt in een trein, en op het ogenblik dat deze vertrekt ziet men hoe de twee wolkenlagen ten opzichte van elkaar in beweging komen; als de trein stopt houdt die beweging op. Men zegt in zulk

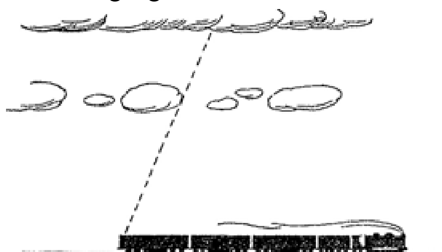


Fig. 43. Door de beweging van de trein ziet men de wolken ten opzichte van elkaar verschuiven, en kan daaruit hun hoogte schatten.

een geval, dat de onderste wolken *parallax* of *verschilzicht* vertonen ten opzichte van de bovenste (fig. 43). En altijd is het in die gevallen zó, dat de verst verwijderde voorwerpen zich in dezelfde zin als de waarnemer schijnen te verplaatsen, de dichtstbij gelegen voorwerpen in tegengestelde zin. De indruk van het hoogteverschil is zeer treffend, men ziet om zo te zeggen diepte in de wolkenlagen en voelt ook zonder redenering hoe ze gerangschikt zijn. - Hetzelfde effekt krijgt men ook in een auto, en in mindere mate op een stoomboot of tram.

In plaats van hoge en lage wolken te vergelijken, kan men ook hun parallax beoordelen ten opzichte van de zon of de maan, die praktisch oneindig ver verwijderd zijn; ter vergelijking dient, dat we de middellijn van de zon en van de maan als een hoek van 1/108 radiaal zien.

Noem de waargenomen hoeksnelheden van de wolken t.o.v. zon of maan α als u in rust bent, β als u beweegt, en stel eenvoudigheidshalve dat de trein met een snelheid v rijdt in dezelfde richting als de wolkensnelheid V. Voor wolken nabij het zenith op een hoogte H is dan klaarblijkelijk:

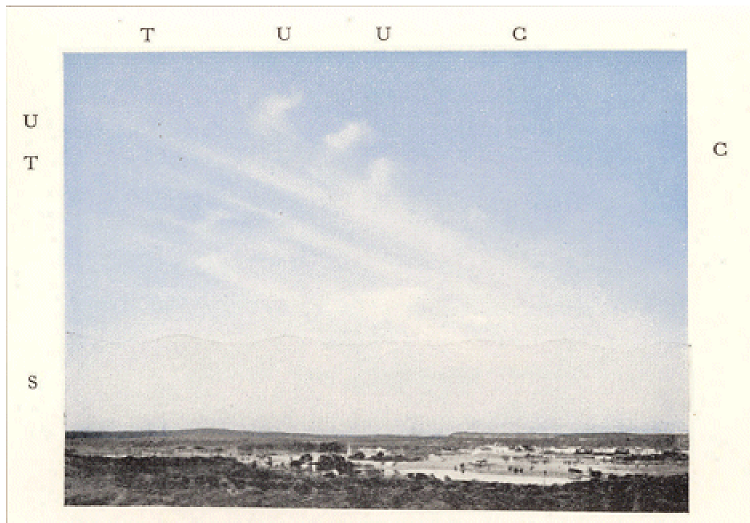
$$\alpha = \frac{V}{H}, \ \beta = \frac{V - v}{H}$$

; dus

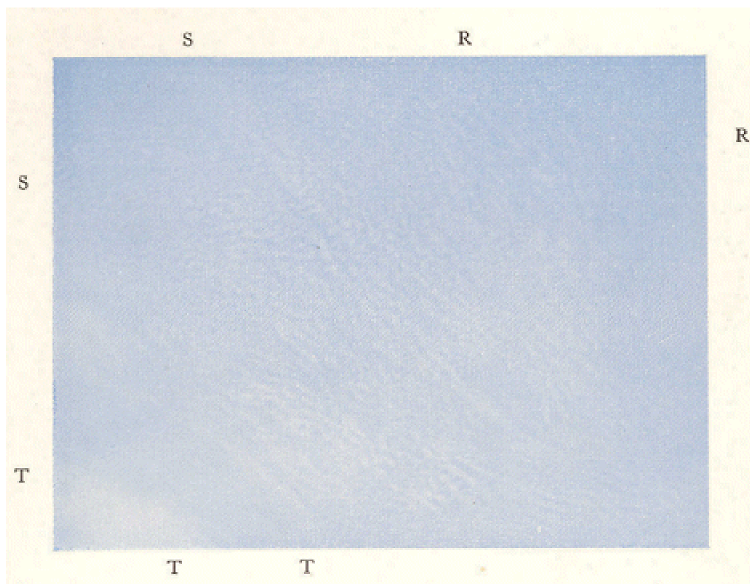
$$V = v \frac{\alpha}{\alpha - \beta}; \ H = \frac{v}{\alpha - \beta}$$

. Daar de snelheid van de trein

1) W. Foerster, Mitt. Ver. Fr. Astr. **15**, 40, 1905.



PLAAT I*a*. Cirrostratus. Naderend minimum. Vooraan, bij T cirruswolken, waarvan enkele opgekruld (U). Bij S versmelten ze tot een cirrostratussluier. Bij C enkele cirrocumuli. Internationale Wolkenatlas, Pl. 129; opgenomen te Potsdam.



PLAAT I*b*. Cirrocumulus. Bij T ziet men hoe deze wolk uit cirrus ontstaat. Twee ribbelstelsels, bij R en bij S afzonderlijk, elders elkaar doorsnijdend. Internationale Wolkenatlas, Pl. 13, opgenomen te Tibidabo.

bekend is, kan men zowel de ware snelheid der wolken als hun hoogte vinden.
De methode is nog weinig toegepast. Schat de hoeken volgens § 218; let op de tekens van *α, β, v*, V! Als de wolken zich niet in het zenith bevinden, maar op een hoogtehoek *ϕ*, blijft

$$V = v \frac{\alpha}{\alpha - \beta},$$

, en wordt

$$H = \frac{v}{\alpha - \beta} \sin \varphi.$$

Als de waarnemer in een andere richting dan de wolken reist, zijn de formules iets ingewikkelder.

105. De bepaling van de hoogte der wolken uit lichtschijnsels.[1)]

Deze methode is bijzonder geschikt voor een gelijkmatige, samenhangende wolkenlaag, waarbij juist de andere eenvoudige methodes moeilijk te gebruiken zijn. - Als we 's avonds door

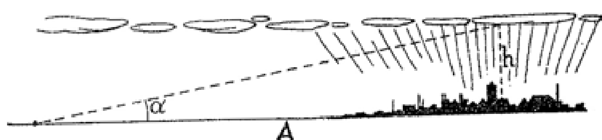


Fig. 44. Gelijkmatige wolkenlaag, verlicht door de lichtschijn ener stad.

het vrije veld wandelen, en de hemel is gelijkmatig bewolkt, zien we van verre hier en daar een lichtschijn, laag aan de hemel (fig. 44). Die schijn is afkomstig van een stad of van een groot dorp, dat we uit de richting wel kunnen herkennen. Schat de hoek *α* van de lichtschijn boven de gezichtseinder in radialen (§ 218), bepaal de afstand A tot aan de stad met behulp van een wandelkaart, en bereken de wolkenhoogte *h* = *α*A. Voorbeeld: van uit Bilthoven zag ik de lichtschijn

boven Utrecht,	$\alpha = 8^{o},5$ en hieruit *h* = 790 m;
boven Zeist,	$\alpha = 6^{o}$ en hieruit *h* = 780 m.

In 1884 was de lichtschijn boven Londen zichtbaar tot op 60 km afstand[2)]; tot hoever zou dit nu het geval zijn? De lichtschijn boven Rochester is soms tot op 150 km waar te nemen!
Het is de moeite waard, de lichtvlek boven een grote stad

1) La Cour, Övers. Dansk Vidensk. Selsk. Forh. 75, 1871. - Een andere eenvoudige methode bij Bravais, Ann. d. Phys. **77**, 156, 1849.
2) Nat. **29**, 104, 1884. - J.R.A.S. Can. **29**, 169, 1935.

nauwkeuriger te bestuderen. Men bemerkt weldra dat zij er van dag tot dag anders uitziet, de veranderlijkheid van het verschijnsel is haast even groot als die van het noorderlicht. Twee bestanddelen zijn in het lichtverschijnsel te onderkennen: 1. een wazige lichtnevel, die ontstaat door de algemene belichting van de lucht met haar stofjes en waterdruppeltjes, en die het sterkst is nabij de gezichtseinder; 2. een lichtvlek op de wolkenlaag, die in werkelijkheid ongeveer de omtrek der stad heeft (dus ongeveer rond), maar die van op afstand verkort wordt gezien, en dus min of meer ellipsvormig lijkt met vrij scherpe randen, vooral als de wolkenlaag goed effen is. Is de lucht helder en onbewolkt, of zeer mistig, dan ziet men geen licht boven de stad. Is de lucht heiig, dan ontwikkelt zich de wazige lichtnevel. Is de lucht met een wolkenlaag bedekt, dan ziet men de lichtvlek. Alle mogelijke combinaties komen voor, ook ziet men soms afzonderlijke lage wolken een schaduw werpen, of men bemerkt hoe onregelmatige lichtmassa's zich van de hoofdmassa afzonderen. De bepaling van de hoogte der wolken geschiedt natuurlijk uit metingen aan de lichtvlek, het nauwkeurigst door het bepalen van de hoogte harer grenzen. In de handen van een goed waarnemer is de methode zo nauwkeurig. dat men b.v. kan onderzoeken of de wolkenlaag de oneffenheden van het terrein volgt.

In bepaalde gevallen bemerkt men dat de wolken belicht worden door de oranje gloed van neonlampen, of door Bengaals vuur van een volksfeest, of door de felle booglampen van een station;[1)] in al deze gevallen is de lichtbron nauwkeurig gelocaliseerd en is de methode die we beschreven goed toe te passen. Nog mooier gaat het als ergens een zoeklicht loodrecht omhoog gericht wordt, en een heldere lichtvlek op de wolkenlaag aftekent.

La Cour slaagde erin dezelfde werkwijze ook bij dag toe te passen. Op een dag toen er sneeuw gevallen was, merkte hij op dat de wolkenlaag donkerder was boven de zee dan boven het besneeuwde land; de grenslijn werd verrassend scherp als men zich zóver verwijderde dat ze zich ongeveer 20° boven de gezichtseinder bevond. Daarna vond hij, dat zich ook boven de bossen donkerder gebieden in de wolkenlaag aftekenden; zelfs de stad Kopenhagen, waar de sneeuw op de huizen al gedooid was, kwam met een dergelijk donkerder gebied overeen. Uit al deze lichtschakeringen kon de hoogte der wolkenlaag bepaald worden, en volgden er goed samenhangende waarden.

1) Ann. Hydr. **25**, 65, 1897.

Van deze verschijnselen is het verschil tussen 't besneeuwde land en de zee het gemakkelijkst waar te nemen, en het eerste waar men zich mee moet oefenen. Het is niets anders dan de beroemde ‘ice-blink’ en ‘water sky’ der noordpoolvaarders, waaraan ze de nabijheid van het pakijs herkennen.

> ‘*Daar zag ik in de avond een merkwaardige lichtschijn over de hemel in 't Noorden, het sterkst nabij de gezichteinder, maar waarneembaar over zijn gehele welving tot aan het zenith, - een wonderlijk, geheimzinnig halflicht, als de weerschijn van een geweldige brand, heel ver weg*; *maar dan in de wereld der spoken, want het licht was spookachtig wit*.’
> Fr. Nansen, Boken om Norge (Kristiania 1914).

Minder bekend is, dat het zand der Egyptische woestijn insgelijks de wolken kleurt met een gloed die duidelijk uit de verte herkenbaar is.[1)]

Een ondiepe plaats in de Indische Oceaan, waar de groene kleur van het zeewater zeer uitgesproken was, wierp een lichtgroene schijn op de 300 tot 400 m hoge wolken.[1)] En zelfs onze bloeiende hei, door de zon beschenen, kan de onderkanten van losdrijvende wolken paars kleuren.[2)]

106. De hoogte van ver verwijderde onweerswolken.

Terwijl het nogal moeilijk is, zich precies rekenschap te geven van de ligging der wolkenlagen boven ons hoofd, gaat dat heel gemakkelijk voor de

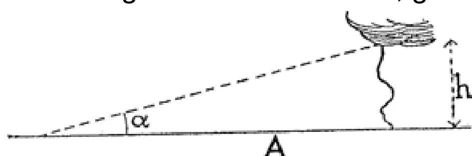


Fig. 45. Bepaling der hoogte van ver verwijderde onweerswolken.

wolkenlagen nabij de gezichteinder: daar ziet men het profiel der wolkenvormingen bijna zuiver. Aan een cumuluslaag valt direkt op hoe de basisvlakken der wolken in één horizontaal vlak gerangschikt zijn; boven de cumuluswolken drijven de ijle veerwolkjes.

De hoogte van onweerswolken die nog ver verwijderd zijn en waaruit de bliksem schiet, bepaalt men, door de afstand A te meten uit de tussenruimte bliksem - donder, en tevens de hoek

1) Vaughan Cornish, Geogr. Journ. **67**, 518, 1926.
1) Vaughan Cornish, Geogr. Journ. **67**, 518, 1926.
2) G.F. Tydeman, Hemel en Dampkring, **19**, 113, 1922.

boven de gezichtseinder te schatten (§ 218). De hoogte is dan (fig. 45) h = A tg α of voor kleine hoeken: $h = \alpha$A. Walter vond aldus hoogten van 1300 tot 2700 m.

107. De hoogte der wolken bepaald uit de waarneming van vliegtuigen.

Als men toevallig een vliegtuig in de wolkenlaag ziet verdwijnen, kan men uit zijn schijnbare grootte (in hoekmaat) tot de hoogte besluiten. Neem aan dat het vliegtuig wellicht 15 m groot is; als u het bijvoorbeeld even groot ziet als zon of maan, is het 15 m × 108 = 1600 m van u verwijderd. We nemen daarbij aan, dat het vliegtuig ongeveer in uw richting vliegt, zodat u zijn spanwijdte onverkort kunt zien. Vermenigvuldig deze afstand nog met de sinus van de hoogtehoek boven de gezichtseinder, dan heeft u een ruwe schatting voor de hoogte der wolkenlaag.

108. De hoogte van lage wolken met de psychrometer bepaald.[1)]

Het is begrijpelijk dat de wolkenvorming in een opstijgende luchtstroom des te eerder zal plaatsgrijpen, naarmate de lucht vochtiger is. Wanneer wij dus aannemen dat de lage wolken die we waarnemen opgestegen zijn van uit de onderste dampkringslagen, kunnen we uit de vochtigheidsgraad hier beneden besluiten op welke hoogte de onderste wolkenlaag zich bevindt.

De ervaring wijst het volgende uit: lees de psychrometer af (§ 91), neem het verschil tussen de droge en de natte temperatuur (in graden Celsius), en deel het door 5. Dit geeft u de hoogte der wolken in kilometers.

De methode is slechts bruikbaar voor wolken lager dan 1,5 km en is ook dan nog ruw. Ze is vooral goed toe te passen op mooiweer-cumuli, zoals die op plaat V*a* afgebeeld zijn.

109. Gemiddelde hoogten van de voornaamste wolkensoorten.

Cirrus	7 -13 km (gem. 8 km)
Cirrostratus	6 -12 km (gem. 8 km)
Cirrocumulus	5 -11 km
Altostratus	3 - 6 km
Altocumulus	3 - 6 km (gem. 4 km)

1) Mc. Adie, Met. Mag. **56**, 227; Annals of the Harvard Observatory, **83**.

Stratocumulus	1 - 3 km (gem. 1,7 km)
Nimbostratus	1 - 2 km
Cumulonimbus (top)	3 - 9 km (gem. 4,5 km)
Cumulonimbus (grondvlak)	0,5- 1,4 km
Cumulus (top)	2 - 3 km
Cumulus (grondvlak)	0,8- 1,4 km
Stratus	< 1 km

Voor de betekenis dezer namen, zie § 115-124.
De hoogte der wolken is het grootst in de tropen en neemt naar de polen toe af; de getallen van het tabelletje gelden voor onze breedten. Bij enkele der belangrijkste wolkensoorten zijn ook de statistisch bepaalde gemiddelde hoogten vermeld.

Ervaren waarnemers die veel met loodsballons werken brengen het zó ver, dat ze zonder enig hulpmiddel voor de lagere wolkentypes de hoogte op 70 meter nauwkeurig kunnen schatten!

Let op het zeer laag drijven van sommige wolken, door na te gaan of de top van een toren reeds in de wolkenlaag verdwijnt. Haidinger vertelt van onweerswolken die op slechts 28 tot 36 meter hoogte dreven!

De cumulus en de cumulonimbus kunnen ontzaglijk hoog worden; men kent gevallen waarin de top tot boven de cirruslaag reikte, en de gehele wolk 9 km hoog was! De meeste laagvormige wolken zijn veel minder dik, meestal slechts 100 tot 500 meter.

110. De afstand der wolken in horizontale richting.

Hoever zijn de wolken verwijderd die we maar enkele graden boven de gezichteinder zien? Dit is onmiddellijk af te lezen uit het volgende tabelletje.

Aantal graden *α* boven gezichteinder	**Afstand A voor een wolk op 5 km hoogte**	**Afstand A voor een wolk op 10 km hoogte**
0°	252 km	357 km
2°	114 km	198 km
5°	54 km	104 km
10°	28 km	55 km

Een cirruswolk kunnen we dus bij goede belichting 300 km ver zien; van Groningen uit zien we zulk een wolk al als ze

boven Antwerpen drijft. Een altocumulus zien we tot ruim 200 km. Een stratocumulus tot

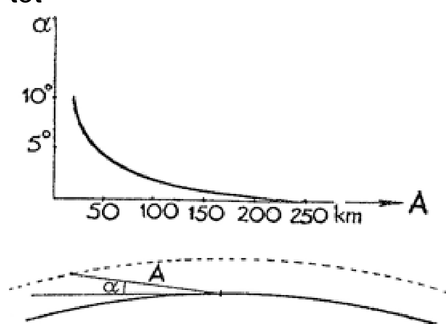


Fig. 46. Hoogte van ver verwijderde wolken boven de gezichteinder.

100 km.

Merkwaardig is het, uit de tabel af te lezen hoe wolken die met eenparige snelheid drijven lange tijd vlak boven de gezichteinder schijnen te hangen, om dan ineens met grote snelheid dreigend omhoog te rijzen; in fig. 46 is dit voor de altocumulus veraanschouwelijkt. Dit is een verschijnsel dat we dikwijls in het vrije veld of op zee kunnen waarnemen, en dat dus uit de gewoonste wetten der perspektief volgt.

111. De bewolkingsgraad.

De meteoroloog is gewoon te schatten welk gedeelte van de hemel bewolkt is, en dat in tienden uit te drukken: 0 = onbewolkt; 5 = half bewolkt; 10 = geheel bewolkt. Het is merkwaardig

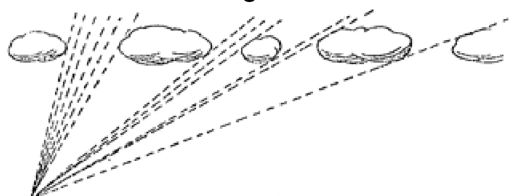


Fig. 47. Nabij de gezichteinder bedekken de wolken elkaar, en overschat men de bewolkingsgraad.

hoe men door de gewoonte zekerheid verkrijgt in het uitvoeren dezer schattingen. Deze gegevens kunnen statistisch verwerkt worden en geven waardevolle inlichtingen over het klimaat en de hoeveelheid zonneschijn die de Aarde bereikt.

Let op wanneer er een wolkenloze dag komt! In Midden-Europa zijn er gemiddeld 12 per jaar, vooral in Maart en September; maar in sommige jaren is er geen enkele.

Wolkenbanken nabij de gezichteinder, die een aaneengesloten geheel schenen te vormen, blijken dikwijls als zij dichterbij komen uit stratocumuli of altocumuli met regelmatige tussenruimten te bestaan. Dit wijst er op dat de gewone schatting van de bewolkingsgraad niet zuiver is, omdat de wolken bij lagere delen van de hemel de openingen enigszins bedekken, zodat men de bewolking overschat (fig. 47). Daarom heeft men voorgesteld vooral te letten op de bewolking in de omgeving van het zenith, maar dit is nog geen algemene afspraak geworden.

112. Hoe groot zijn de wolken?

Als de schaduwen van de wolken over de aarde lopen, kunnen we hun afmetingen schatten: de schaduw is even groot als de wolk, want de zonnestralen zijn evenwijdig.

Een andere manier bestaat in de bepaling van de hoek α (in radialen) waaronder men de wolk ziet (§ 218), tegelijk met de schatting van de afstand A. De ware grootte is dan αA.

113. De bestanddelen van de wolken.

Waarom lange bespiegelingen houden over de bestanddelen waaruit de wolken gevormd zijn, als men zelf kan gaan kijken? Assmann heeft op de top van de Brocken, in de winter, de waterdruppeltjes die de wolken vormen rechtstreeks onder 't mikroskoop waargenomen. Het zou de moeite waard zijn, dit eens bij dikke mist hier in de vlakte na te doen! Het mikroskoop moest enige uren buiten staan om geheel af te koelen; dan werd er een goed gepoetst objectglaasje onder geschoven en bij een vergroting van 200 × waargenomen.

De druppeltjes die Assmann op het glazen plaatje zag neerslaan hadden een middellijn van 0,014 tot 0,040 mm, hetgeen hij met een oculair-mikrometer mat. Door het licht met de mikroskoopspiegel schuin te laten invallen, kon hij de druppeltjes nog beter zien; hij schatte dat hun hoogte misschien 1/10 van deze middellijn was, en berekende daaruit dat de druppeltjes 0,007 tot 0,015 mm groot waren toen ze nog zweefden.

Vroeger dacht men dat de wolken uit holle blaasjes bestaan; maar Assmann kreeg niets dergelijks te zien; het waren zeer klaarblijkelijk druppeltjes. Daarenboven had men ondersteld dat elke druppel om een stofkorrel als condensatiekern ontstaan was; daar nu Assmann de druppeltjes snel zag verdampen, beproefde hij bij een vergroting 400 iets van die stofkern te bespeuren: dit mislukte echter volkomen: de kernen zijn blijkbaar

veel kleiner dan wat men met het mikroskoop nog kan waarnemen.

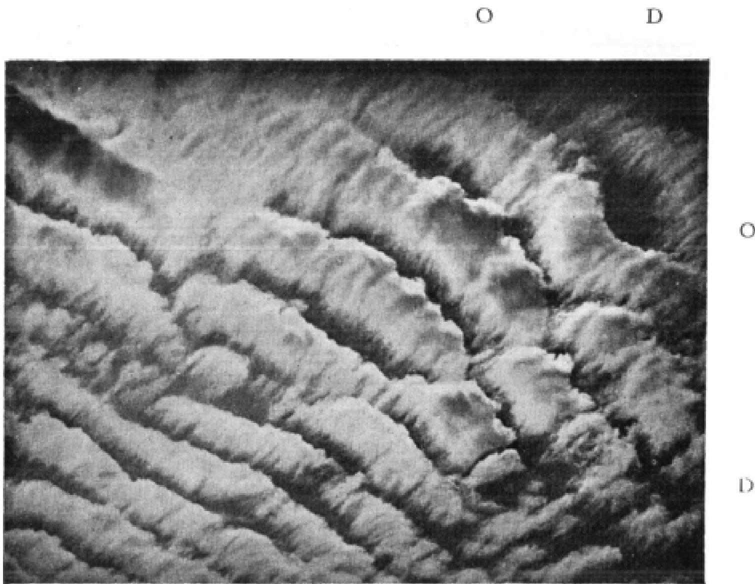
Voor lezers die de proef willen herhalen zij nog gezegd, dat men goed doet het objektglaasje te bedekken met een mengsel van 1 deel vaseline en 4 of 5 delen lichte minerale olie (petroleumaether, benzine); de waterdruppeltjes worden geheel door deze vloeistof bedekt, verdampen niet, en kunnen rustig bekeken worden.[1)]

De vereniging van die kleine wolkendruppeltjes tot grotere en tenslotte de vorming van regen is een zeer merkwaardig en nog niet goed opgehelderd proces, nauw verwant aan het uitvlokken van een colloïdale stof. Van groot belang is daarbij, dat de druppeltjes meestal elektrisch geladen zijn, soms alle gelijk, soms verschillend van teken; verder, dat dikwijls ijskristalletjes en waterdruppeltjes naast elkaar kunnen voorkomen.

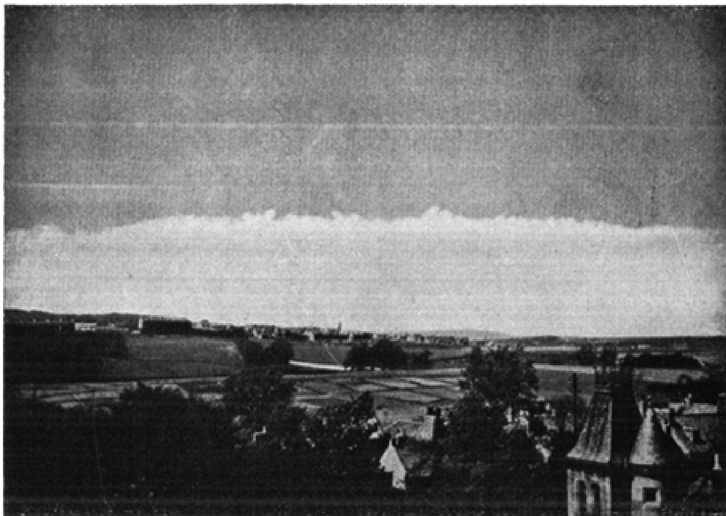
Er blijft nu alleen nog te overwegen waarom de druppeltjes waaruit de wolken bestaan niet neervallen, maar zwevende blijven. Het antwoord is, dat ze wel vallen, maar zó langzaam dat wij er niets van merken; en dat de opstijgende luchtstroom waarin ze zich meestal vormen, al voldoende is om ze in de hoogte mee te voeren. Zodra het vallen begint, neemt de wrijvingsweerstand der druppeltjes toe, en weldra bereiken ze een zekere grenssnelheid, waarbij de versnelling van de zwaartekracht juist door de wrijving opgeheven wordt. Volgens een beroemde formule van Stokes, wordt de grenssnelheid van zulke kleine druppeltjes in ronde getallen: 1000000 r^2, waarbij de straal *r* van het druppeltje in cm, de snelheid in cm per sekunde uitgedrukt zijn. Voor een wolkendruppeltje van 0,02 mm middellijn is $r = 0{,}001$ cm; het valt dus met een snelheid van slechts 1 cm per sekunde, hetgeen uiterst gering is vergeleken met de gewone snelheden van luchtstromen in de dampkring.

Men kan ook de grootte der wolkendruppeltjes bepalen door optische waarnemingen, en komt dan tot dergelijke waarden als de hier aangehaalde (I, § 161). De optische waarneming leert echter ook, dat er wolken zijn die niet uit *druppeltjes*, maar uit *ijskristalletjes* bestaan; het zijn die welke in de hoogste, koudste lagen drijven. Deze kristalletjes zijn vrijwel even klein als de waterdruppeltjes, en blijven door dezelfde oorzaken zweven.

1) Ann. Hydr. **62**, 390, 1934; **139**, 111, 1937. Anderen wrijven het glaasje in met machine-olie, of dompelen het even in gesmolten paraffine (Americ. Journ. of Sc. **17**, 160, 1904); nog anderen gebruiken een draadje van enkele 0,1 mm dikte, lichtjes ingevet.



PLAAT II*a*. Altocumulus. In ribbels, loodrecht op de ribbelrichting uitgerafeld. Op vele plaatsen (O) ziet men hoe de middenste delen der ribbels donkerder zijn dan de randen. Bij D beginnen de wolken zich op te lossen. Internationale Wolkenatlas, Pl. 28, opgenomen door A.W. Clayden.



PLAAT II*b*. Altocumulus castellatus. Een vlakke bank, waaruit ‘donderkopjes’ groeien. Wijst op opstijgende luchtstromen, weldra zal het onweren. Internationale Wolkenatlas, Pl. 40, opgenomen door G.A. Clarke.

Overzicht der wolkenvormen met de gebruikelijke afkortingen.

Hoge wolken.

(gewoonlijk meer dan 6000 m hoog).

Cirrus	Ci
Cirrocumulus	Cicu
Cirrostratus	Cist

Gemiddeld hoge wolken.

(gewoonlijk tussen 2000 en 6000 m).

Altocumulus	Acu
Altostratus	Ast

Lage wolken.

(gewoonlijk niet meer dan 2000 m hoog)

Stratocumulus	Stcu
Stratus	St
Nimbostratus	Nbst

Wolken met vertikale bouw.

(gewoonlijk tussen 500 m en cirrushoogte).

Cumulus	Cu
Cumulonimbus	Cunb

114. De onderverdeling der wolkenvormen.

Wie het oneindige wil verkennen
Moet onderscheiden en verbinden.
Daarom is 't dat mijn lied ik wijde
Den man die wolken onderscheidde.

Ter nagedachtenis van Howard[1].

Als heerlijk Kamaroepa, de godin,
Door 't luchtruim zwevend, zwaar door licht vervangt,
In 't wisselen der gestalten zich verheugt,
Soms stil zich houdt, soms wegvliedt als een droom,
De sluierveren samenvoegt, verdeelt,
Dan staren wij verbaasd naar 't wonderbeeld.

Nu gaat aan 't werk de eigen vormingskracht,
Die 't onbepaalde tot bepaaldheid maakt:
Hier dreigt een leeuw, daar dringt een olifant,
Kamelenhals verandert in een draak;
Ginds komt een leger, maar 't verliest de slag,
Want tegen steile rotsen breekt zijn macht;
De trouwste wolkenbode zelfs bezwijkt
Eer hij de liefste in 't verre land bereikt.

Gij echter, Howard, geeft met heldren geest

Ons 't heerlijk voordeel van Uw wetenschap.
Wat men niet vatten, niet bereiken kan,
Gij houdt het voor de eerste maal nu vast;
Bepaalt het onbepaalde, perkt het in,
Benoemt het treffend. U zij dus de eer!
Als wolken stijgen, vallen, zwermen saam,
Herinnert men zich dankbaar Uwen naam!

J.W. Goethe, Gott und Welt (1821[2].

Dit vers van Goethe schildert op treffende wijze de moeilijkheid der wolkenkunde. Geen twee wolken zijn aan elkaar gelijk, de waarnemer is het, die in die vlottende gestalten gemiddelde typen leert terugvinden. De onderverdeling van Howard vormt nu nog de basis van onze rangschikking: *cirrus, cumulus, nimbus, stratus*, met hun combinaties twee aan twee. De moderne classificatie is echter evengoed bepaald door de ontstaanswijze der verschillende wolken als door hun uitwendige vormen; zij is neergelegd in de internationale wolkenatlas en door tal van prachtige wolkenfoto's toegelicht.

1) Die in 1803 een rangschikking der wolken gaf, welke in hoofdzaak nog in gebruik is; van hem zijn ook de namen der wolken.
2) Zie aldaar ook Goethe's gedichten over Stratus, Cumulus, Cirrus, Nimbus. Vgl. insgelijks Shakespeare, Antonio and Cleopatra, IV, 12.

Om te beginnen leze men aandachtig de beschrijvingen van elke type, en trachte zich dit aan de hand van de plaatjes voor te stellen en in te prenten. Daarna is het zaak veel naar de hemel te kijken, te schetsen en te bewonderen, in twijfelachtige gevallen de wolkenatlas raadplegend. Heeft men enige zekerheid in het benoemen der wolkenvormen verkregen, dan begint het volgen der veranderingen welke de wolken ondergaan; dit is het belangwekkendste gedeelte van de wolkenkunde, vooral als ze aan de hand van een diepergaande meteorologische studie der hogere luchtlagen wordt beoefend. Het gehele gebied is een bron van groot genot zowel voor den oppervlakkigen waarnemer als voor den vakman.

Let wel!

En als we onderscheiden hebben,
Dan moeten we den groei en 't leven
Aan de onderdelen weer verlenen,
Hen naar ontwikkeling laten streven.

Zo doet de schilder, de poëet,
Met Howard's indeling vertrouwd,
Die 's ochtends vroeg, des avonds laat,
Ten hemel onderzoekend schouwt.

Hij laat de onderscheiding gelden,
Maar ziet in 't luchtig wolkenwoelen
Ook overgang en zacht veranderen.
Dit leert hij vatten, denken, voelen.

J.W. Goethe, Gott und Welt (1821).

115. Cirrus = veerwolken. (Plaat I*a*, I*b*, II*a*, III*a*, VII*b*)

Ik ben de wolkenspinster uit het Noorden,
Ik spin de fijnste wolken die het hoogst
Drijven en draven, bloesems uit den oogst
Die 't zonlicht overdag maait van de zee.
Het fijnste komt het hoogste, dat verzamel
Ik in een kluwen, zie hoe den belhamel
Een kudde al gevolgd is uit mijn zaal.
Gij ziet ze ov'ral weiden zonder tal.

H. Gorter, Mei, blz. 99.

O Wolkensnee, zoo wit als schuim
van zuivel of van zilver, 't ruim
des hemels schijnt één weefgetouw
van zonnelicht en zijden draad.

G. Gezelle, Rijmsnoer VIII (Wolkensnee).

Het zijn afzonderlijke, witte wolken met vezelige bouw, die geen schaduwen op elkaar werpen, en dikwijls zijdeachtig glanzen. Van alle wolken zijn dit de hoogste. Ze zijn zo ijl, doordat de lagen waar ze ontstaan zeer koud zijn en maar weinig waterdamp kunnen bevatten. Ze bestaan uit ijskristalletjes, doch vertonen zelden halo's (I, § 134, 135) omdat hun korreltjes te klein zijn. De streperigheid ontstaat doordat de grootste kristalletjes sneller vallen dan de kleine, en in lagen van andere windsnelheid terecht komen. - De cirri vertonen een grote verscheidenheid van vormen.

Eerste groep: uitlopers van een lage druk-gebied, die na een periode van mooi weer de naderende bewolking, regen, slecht weer aankondigen; nog vóór de barometer begint te dalen ziet

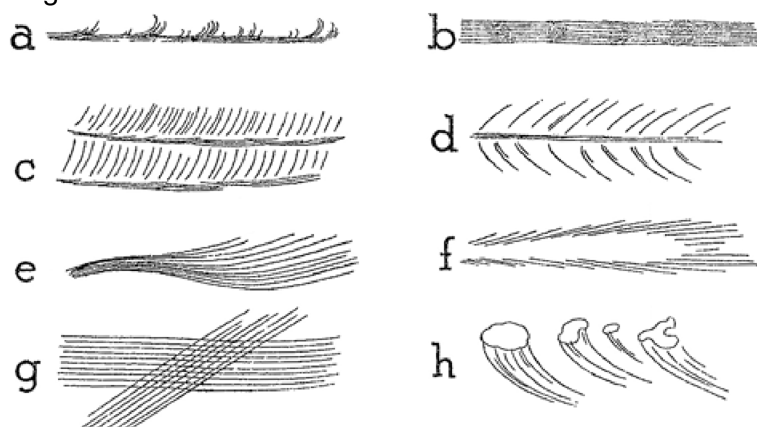
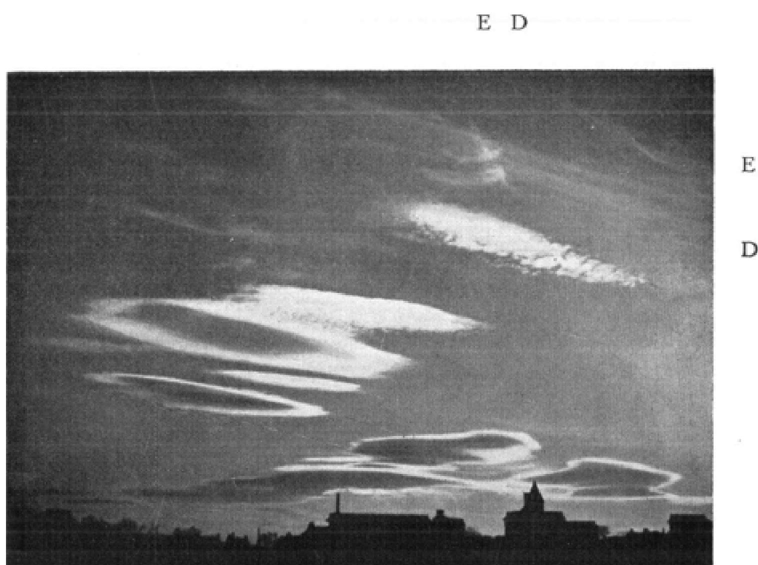


Fig. 48. Verschillende vormen van cirrus-wolken.

men ze al uit het Westen aan komen drijven, terwijl de benedenwind nog Zuid is (Plaat I*a*). Uit hun toenemende dichtheid kan men tot het naderen der depressie besluiten. Wazige, mistige cirruswolken die niet stelselmatig dichter worden, leren ons daarentegen dat de luchtdruk in onze omgeving vrij gelijkmatig verdeeld is, maar dat er kleine, ondiepe minima voorkomen.

Soms zijn het evenwijdige draden, van afstand tot afstand opgekruld (fig. 48, *a* laag aan de hemel, *b* in 't zenith); dit zijn de eerste voorboden van de lage druk, het zijn typische brandings-



PLAAT III*a*. Altocumulus lenticularis. Aan de Noord- of Zuidzijde van een minimum. De wolkenbanken zijn los van elkaar en hebben ‘lensvorm’, het midden van elke bank is veel donkerder dan de randen. Bij D zijn de wolken dunner, ze lossen zich op. Bij E, ijle cirri. Internationale Wolkenatlas, Pl. 34; opgenomen door G.A. Clarke.



PLAAT III*b*. Altostratus. Nabij het centrum van een typisch minimum. De zon is nog zichtbaar door de wolkensluier, maar ze heeft geen scherpe rand en er is geen kring. Tegen deze lichte achtergrond tekenen zich enkele fraktostratuswolken af. Internationale Wolkenatlas, Pl. 43; opgenomen door G.A. Clarke.

golven, die zich daar vertonen waar de aankomende luchtgolven overstorten en gaan wervelen.

Andere malen zijn het waaiers van rechte draden met dwarse vertakkingen (fig. 48 *c*), dikwijls in ‘poolbanden’ van een punt van de gezichteinder uitstralend.

Tweede groep: vervormingen van de wolken van de eerste groep, wanneer deze in woelige luchtlagen terecht komen. Hun uitgerafelde vormen zijn valstrepen, wijzend op de zeer verschillende windsnelheden die dicht naast elkaar voorkomen. Zij kondigen geen wind of slecht weer aan.

Windveren (fig. 48*d*), altijd bewegend naar de punten der zijtakjes toe; ‘paardestaarten’ en ‘kattestaarten’ (*e, f*);

gekruiste vezels (*g*); bij zonsondergang kan men soms zien dat het twee lagen zijn, de onderste komt al in de schaduw terwijl de bovenste nog purper gekleurd is;

vlokjes met valstrepen (*h*);

Op een zeer bijzondere wijze verschijnen de *onweerscirri*, waarover we hier een en ander meedelen, alhoewel dit pas goed begrijpelijk zal zijn voor wie eerst § 123 en 124 over de cumulus en cumulonimbus gelezen heeft. Op buiige dagen ziet men deze cirrusveren of schermen uitschieten van de bovenranden der hagelwolken, die aldus een zeer kenmerkende *aambeeldvorm* krijgen (Plaat VI*a*). De dichtheid dezer cirrusvormingen kan zo groot zijn, dat ze schaduwen vertonen. In elk geval zijn het ‘echte’ cirri, net zo goed als die, welke in de hoogste lagen zweven, want meer dan eens heeft men er halo's in gezien, die bewijzen dat ze uit ijskristalletjes bestaan. Deze cirrusschermen strekken zich ver om de wolk heen uit, gemiddeld zien wij ze 4 uur vóór de eigenlijke onweerswolk ons bereikt, en nog 1 uur na het onweer.

Er is een vermoeden dat de cirruswolken die de lage drukgebieden omgeven op een dergelijke manier ontstaan zijn, echter op groter schaal, als bekroning van de machtig opgestapelde cumuli in al hun variëteiten. Zij zouden dan door de wind over honderden kilometers meegevoerd worden en aldus de voorboden zijn van de naderende depressie. Niet alle meteorologen zijn het met die opvattingen eens.

116. Cirrostratus (Plaat I*a*).

Een fijne witte sluier, die dikwijls aan een groot deel van de hemel een eenvormig wit uiterlijk geeft, en soms min of meer duidelijk uit draden opgebouwd is als vilt (dit is nog het best bij mane-

schijn te zien). Dikwijls zoudt u niet weten dat er een wolkensluier is, als het niet was dat hij het blauw van de hemel min of meer in melkwit doet overgaan. De zon en de maan blijven nog schaduwen teweegbrengen, maar gaan er eigenaardig waterig uitzien, alsof ze door mat glas schenen; bijna altijd ontstaan kringen of andere haloverschijnselen, hetgeen met stelligheid bewijst, dat deze wolken uit ijskristalletjes bestaan.

De cirrostratus-wolken treden meestal aan de vóórzijde van barometrische depressies op of van randminima. Ze zijn dus dikwijls de voorboden van zwaardere bewolking en regen.

117. Cirrocumulus = 'fijne schaapjeswolken' ('wolballen,' 'lammetjeswolken'). (Plaat I*a*, I*b*).

En beiden keken en ze zagen loopen
En klimmen schapewolkjes, wit gevacht,
Zooals in zee de golven schuimgevacht.
Sommigen doolden af, leken alleen
Te loopen droomen, kijkend voor zich heen,
De meesten gingen samen in één pas
Alsof 't een leger van soldaten was.

H. Gorter, Mei, blz. 99[1)]

Een laag of bank van cirrus-achtige wolkjes, die uit afzonderlijke witte vlokjes of zeer kleine balletjes bestaan welke geen schaduwen vertonen, niet vezelig van bouw, dikwijls in rijen of golfjes. Meestal ontstaat hij uit cirrus of cirrostratus, dikwijls zijn allerlei overgangsvormen nog merkbaar. Een echte cirrocumulus komt niet dikwijls voor. De verschillende vormen waarin deze wolkensoort zich voordoet hebben ieder hun eigenaardige bekoring[2)]; de vlokjes kunnen rond of veelhoekig zijn of min of meer vormloos, scherp of wazig begrensd, doorschijnend of dik en wit; er is ook een vorm waarvan de vlokjes in 't midden een gaatje vertonen! Meestal worden de vlokjes kleiner naar de randen van de wolkenbank toe.

1) Vgl. ook Virgilius, Georgica, I, 397.
2) A. Bracke, Hemel en Dampkring, **2**, 88, 1904.

118. Altocumulus = grove schaapjeswolken. (Plaat II*a*, II*b*, III*a*, VII*a*, VII*b*).

Een wolkenlaag die uit vlakke ballen of rollen bestaat, enigszins regelmatig gerangschikt in rijen of groepen. Ze lijkt op cirrocumulus, maar de vlokken zijn grover, in het midden donkerder dan aan de randen. Soms is de blauwe lucht tussen de vlokken te zien, andere malen sluiten ze meer aan. Dikwijls iriseren ze (I, §166) of vertonen kransen (§ 160). In het midden van de wolkenbank zijn de vlokken dichter en groter en naderen tot de stratocumulusvorm, aan de randen zijn ze fijner en gaan gelijken op cirrocumulus. In andere gevallen vertoont deze wolk overgangsvormen naar altostratus of nimbostratus.

Een andere variëteit vormt zich op heldere zomermorgens, bij zonsopgang, als een vlakke laag op ongeveer 4 km hoogte, waaruit zich een rij kleine, witglanzende cumuluskopjes als een lokkige hoofdbekleding ontwikkelt (Plaat II*b*); de lucht is niet mooi blauw meer, ze heeft een violette tint. Even daarna is alles verdwenen, maar men kan er op rekenen dat er die dag onweer komt, vooral als het weder warm en vochtig is; gemiddeld volgt het 12 uur later. Dit is de altocumulus castellatus, die ons volk als ‘donderkopjes’ kent, en die de wolkenkundige Cl. Ley ‘mijn lieveling’ noemde. Dat hij veel hoger ligt dan de echte cumuli kan men aan de langzaamheid van zijn schijnbare beweging bemerken. Zijn ontstaanswijze wijst op het bestaan van een steil temperatuurverval boven een geringe inversie: deze laatste geeft aanleiding tot de vorming der wolkenbank, het steile verval brengt de lucht tot opstijgen en veroorzaakt de vorming der cumuluskopjes[1)].

Boven op een grote onweerscumulus of cumulonimbus in vorming ziet men dikwijls, vooral bij buiig weer, glanzend witte, fijne altocumuluslaagjes die over de grote wolk uitgespreid zijn (fig. 49); soms ziet men in die *wolkenkapjes* mooie iriserende kleuren (I, § 166). Schat de hoek waaronder u het wolkenkapje ziet, schat de afstand van de wolk, en bereken daaruit de ware dikte van het kapje: men vindt verrassend kleine bedragen (10 tot 60 meter!). Als men het geluk heeft een snelgroeiende cumuluswolk waar te nemen (fig. 49), kan men zien hoe een dergelijk

1) Men past thans het woord ‘castellatus’ ook toe op andere wolkenvormen, telkens als men steil opstijgende wolken wil kenmerken die hoger dan breed zijn. Zij wijzen altijd op het bestaan van sterke opwaartse luchtstromen en zijn daardoor in 't algemeen de voorboden van onweer.

kapje in minder dan een minuut ontstaat; even vóór de cumulustop het kapje bereikt ziet men hoe dit opgelicht wordt en zich lichtjes welft; dan groeit

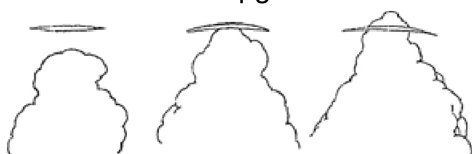


Fig. 49. Een cumulonimbus groeit door een wolkenkapje heen.

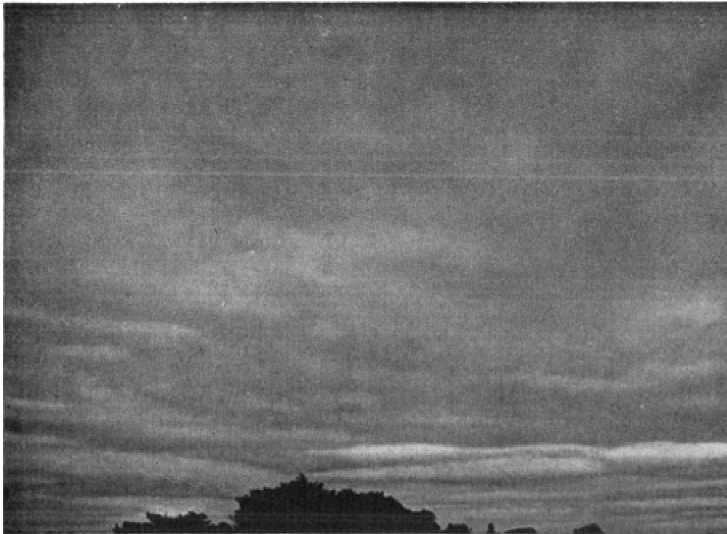
de cumulus in het kapje, breekt er doorheen .... en heeft een kraag met uitstralende randen gekregen. Het proces kan zich op grotere hoogte herhalen, in zeldzame gevallen vormen zich drie of vier dergelijke kragen boven elkaar, n.l. bij bepaalde hagelwolken, die dan een groots schouwspel opleveren. Als men op een zomerse dag onweer vreest, behoeft men maar op de wolkenkapjes te letten: zolang ze ontbreken is het veilig; hun verschijnen bewijst dat men op zijn hoede moet zijn; zijn ze al op verscheiden plaatsen door de groeiende onweerswolken doorboord, dan is dit een bewijs dat de stabiele lagen van de dampkring (de inversies) het niet uithouden tegen de onweerstaanbare opwaartse beweging der lucht: het onweer is dan nabij.

Een bijzonder fraaie altocumulusvorm is die welke als *altocumulus lenticularis* (= 'lensvormig') bekend is. Hij ontstaat, wanneer de wolkenkapjes van de cumuluswolken loslaten, of wanneer zich ergens gelijkmatig dalende luchtstromen vormen, waarin de altocumuli of altostratuswolken zich oplossen. Het zijn kleine afzonderlijke wolkenbanken, spoelvormig, met zilverwitte randen, dikwijls iriserend (Plaat III*a*).

119. Altostratus (Plaat III*b*).

Een vezelige wolkensluier, gelijkend op een dichte cirrostratus, maar min of meer grauw, blauwachtig, en slechts half zo hoog. De zon schijnt er doorheen als door matglas, de schaduwen verdwijnen. Hoewel de wolk uit ijsdeeltjes of sneeuwkristalletjes bestaat, vormen zich geen kransen noch kringen.

Deze wolkenvorm vertoont overgangen naar de altocumulus enerzijds, naar de altostratus of de nimbostratus anderzijds. Hij verschijnt meestal vlak voor een depressie, als een fijne sluier onder de altocumuluslaag, op een 3000 m hoogte, die voortdurend dichter wordt en tenslotte door regen gevolgd wordt.



Plaat IV*a*. Dichte stratocumulus. De wolk gaat reeds in stratus over. Nabij de gezichtseinder, rangschikking in evenwijdige strepen (perspektief-effect). Vormt zich door nachtelijke afkoeling. Internationale Wolkenatlas, Pl. 169, opgenomen door Baker.



PLAAT IV*b*. Stratocumulus. Grove vlokken die donkere schaduwen vertonen, daartussen echter is de laag zeer dun en ziet men de heldere hemel. Rangschikking in rijen nabij de gezichteinder (perspectief-effekt). Internationale Wolkenatlas, Pl. 49; opgenomen door Clarke.

120. Stratocumulus. = gelaagde stapelwolken (‘lappendeken’). (Plaat IV*a*, IV*b*).

Een wolkenlaag bestaande uit vlakke schollen of ballen, die dikwijls de hele hemel bedekken. In 't algemeen ziet zij er uit als een grauwe massa, die in min of meer onregelmatige stukken verdeeld is; in de tussenruimten schemert soms het blauw van de hemel door, aan de randen zijn de vlokken kleiner en gelijken meer op altocumulus. Als men naar de gezichteinder kijkt, ziet men de stratocumuluswolken in langwerpige rijen gerangschikt; dit is echter meestal slechts een perspektief-effekt! Want men ziet de strepen evenwijdig aan de gezichteinder, naar welke hemelrichting men ook kijkt. Bij het zenith zien we slechts onregelmatige grondvlakken, zonder regelmatige rijen. De benaming ‘rol-cumulus’ is dus meestal fout. Deze wolkenvorm kan overgangen vertonen naar de altocumulus, de stratus en de nimbostratus. Op zomermorgens heeft hij een neiging zich tot cumuli te verdichten. Omgekeerd ontstaat hij dikwijls doordat een cumulus zich bij een bepaalde inversielaag horizontaal uitbreidt.

De stratocumulus verschijnt dikwijls 's winters aan de zuidrand en aan de achterkant van een depressie, vermoedelijk als overblijfsel van de onderste delen der cumulonimbuswolken, welke bezig zijn zich op te lossen. Daarnaast vinden we hem ook in hoge druk-gebieden, meestal 's zomers, als overblijfsel van cumuli. In beide gevallen is de kans op regen zeer gering.

121. Stratus = laagwolk, mistwolk (Plaat IV*a*).

Een gelijkmatige wolkenlaag; eigenlijk een nevel, maar die niet op de aarde rust. Hij is iets ongelijkmatiger dan de nimbostratus. Als er regen uit valt, is het een fijne miezelregen bij eenvormig nevelige lucht. Wordt de wolkenlaag door de wind gescheurd, dan ontstaat een fraktostratus of fraktocumulus. Men ziet de stratus ook als afzonderlijke lensvormige massa's, zwevend over heuvels; of aan de randen van grote donderwolken, donker tegen de helderder wolk als achtergrond. Lage stratuswolken vormen zich door de nachtelijke uitstraling van de grond (§ 96); als de lucht niet ver van het dauwpunt is, schijnt haar eigen uitstraling soms voldoende te zijn om een effen stratuslaag op vrij grote hoogte te vormen, die meestal snel de gehele hemel overdekt.

122. Nimbostratus = regenwolk.

Eenvormige, lage wolk, donkergrijs. met uitgerafelde randen. Dikwijls valt er regen of sneeuw uit, of ziet men valstrepen in de verte (plaat VI*b*). Hij ontstaat uit altostratuswolken die lager en dichter worden; onder de nimbostratus vormen zich fraktocumuli of fraktostratuswolken, en dan begint een langzame, gelijkmatige regen te vallen. In de tussenruimten tussen de nimbuswolken ziet men dikwijls een hoger zwevende laag van cirrostratus of altostratus.

123. Cumulus = stapelwolk. (Plaat V*a*, V*b*, VII*a*, VII*b*).

Iedere wolk heeft een zilveren omlijning.
(Engelsch Spreekwoord).

Afzonderlijke, dikke wolken, vertikaal ontwikkeld, waarvan het bovenste gedeelte de koepelvorm heeft en met ronde uitwassen bezet is, terwijl de onderkant bijna horizontaal is. De vlakken die door de zon verlicht zijn schijnen helder wit, de andere vertonen diepe schaduwen. Tegen de zon gezien zijn ze donker met een zilveren omranding. Cumuluswolken zijn moeilijk te herkennen als ze boven ons hoofd drijven: de vlakke onderkant bedekt dan voor ons oog de wolkenberg die zich daarboven bevindt; kenmerkende cumulusvormen zien we daardoor slechts tot een beperkte hoogte boven de gezichteinder. Ze zijn nooit vezelig, overal scherp begrensd, alsof het een vaste massa was, uitgezonderd op de punten waar de wolk zich oplost of aangroeit en waar men hem z.g. 'roken' ziet. Soms drijft de top vooruit, terwijl de basis achteraan komt, hetgeen bewijst dat de windsnelheid in de hogere lagen toeneemt. Het omgekeerde geval komt echter ook voor, n.l. aan de achterkant van een depressie.

'De cumulus is het zichtbare kapiteel van een onzichtbaar opstijgende luchtzuil.' Dat blijkt bijvoorbeeld uit de vorming van een cumuluswolk die men dikwijls boven een bosbrand kan waarnemen[1)]. Eerst stijgt de rook op, doordat de warme lucht van de brand lichter is dan de omgevende dampkringslucht; dan blijft hij op een zekere hoogte hangen, een bewijs dat daar een laag abnormaal warme lucht zweeft, een 'inversielaag,' waar hij niet doorheen kan. Als meer en meer warme lucht opstijgt en de temperatuur steeds toeneemt, komt er een ogenblik

1) Talloze gevallen, bijvoorbeeld:
Hergesell, Das Wetter, **25**, 235, 1908; **34**, 178, 1917; - L. Hobma Hemel en Dampkring, **16**, 10, 1918. - M.W.R. **47**, 143, 1919; enz.

waarop de warme luchtzuil door de inversielaag breekt: door de plotselinge stijging zet de lucht uit, wordt kouder en er vormt zich een mooie cumuluskop boven het brandende bos. Is de dampkringstoestand gunstig, dan kan zich zulk een alleenstaande cumulus reeds boven een gewone huisbrand vormen. Het is de moeite waard, van een bekende afstand A de hoogte α in hoekmaat van zulk een wolk boven de gezichteinder te bepalen; de hoogte der wolk is dan A tg α.

Men heeft vroeger wel eens gedacht, dat de werking van de rook bestond in het leveren van condensatiekernen waarop de waterdamp kan neerslaan (§131). Dit is echter niet zo: rook van ontploffende granaten geeft nooit aanleiding tot wolkenvorming. Het is dus wel *de verwarming* door de brand, en de opstijgende beweging die er gevolg van is, welke de cumulusvorming veroorzaken (zie evenwel § 131).

Op een dergelijke wijze ontstaat nu de *mooi weer-cumulus* op een warme zomerdag, als de aarde verhit wordt door de bestraling der zon, en overal zuilen hete lucht oprijzen. Waar die lucht opstijgt, koelt ze door uitzetting af, tot het dauwpunt bereikt is, en de vochtigheid die de lucht bevat als druppeltjes neerslaat. Eigenlijk moet een zekere *over*verzadiging bereikt zijn eer condensatie optreedt, zodat ineens een grote hoeveelheid latente warmte vrij komt, en de lucht in opgeblazen, bolle vormen uitzet. De oppervlakkige gelijkenis van de cumulus met de wolken uit een lokomotief is door deze ontstaanswijze wel begrijpelijk: in beide gevallen ziet men aan de vorm, dat een opstijgende dampzuil in een rustige dampkringslaag binnendringt. Bij mooi weercumuli is de neiging tot opstijgen niet zeer uitgesproken, ze worden niet hoog en vertonen aan de bovenkant zachte rondingen. Op een zomerse morgen, als overal de witte wolkengevaarten oprijzen, krijgt men onwillekeurig de indruk dat over 't hele landschap de horizontale grondvlakken van de wolken vrijwel in één vlak liggen (Plaat V*a*). Dat is inderdaad zo; dit vlak is eenvoudig het niveau waar de opstijgende lucht het dauwpunt bereikt heeft. Hoe droger de lucht, hoe hoger het grondvlak der cumuli; het ligt 's ochtends in de buurt van 1000 m, en stijgt geleidelijk tot een 2000 m in de loop van de dag; 's avonds nemen het aantal en de dikte der cumuli weer af. Boven de zee vormt zich zo goed als nooit een mooi weer-cumulus. Integendeel, telkens kan men waarnemen hoe deze wolken zich oplossen als ze van het land naar de zee drijven; soms ziet men een hele dag lang de lucht bewolkt boven het land, helderblauw boven de zee. De zee wordt

nooit zoveel warmer dan de lucht, dat daarboven sterk opstijgende luchtstromen ontstaan (vgl. § 130).

Merk op, hoe de lucht onder de cumuluswolk dikwijls heiïg, nevelig lijkt, zodat bundels zonnestralen daarin de schaduw van de wolk aftekenen. Later op de dag groeien onder de eigenlijke wolk kleine losse cumuli, die des te groter worden, naarmate de hoofdwolk het cumulonimbusstadium nadert. Dit hangt samen met het feit dat de aangroei van de cumulus in zijn latere stadia niet meer van de grond af gebeurt, maar door lucht die aan de onderkant van opzij toestroomt.

Op zomermiddagen, als de wolken over het land zeilen, kan men opmerken hoe de schaduw van een voorbijtrekkende cumulus gepaard gaat met het aanzwellen van een zachte, verfrissende bries. Blijkbaar koelt de lucht in de wolkenschaduw al voldoende af om merkbaar zwaarder te worden dan de omgeving en benedenwaarts te stromen.

Naast de mooi weer-cumulus is er een andere vorm, de *dynamische cumulus*, die ontstaat wanneer de lucht door wrijving gaat golven, wervelen en opstijgen. Meestal begint die stijgende beweging niet van de grond af, maar van een veel hoger niveau; dan ontwikkelen zich de prachtige ‘bloemkoolvormen,’ die tenslotte in cumulonimbus kunnen overgaan; hun grondvlak is niet effen en scherp begrensd, geleidelijk gaan ze over in het blauw van de hemel. Dergelijke wolken zijn dikwijls de voorboden van onweer. De lange rijen cumuli die men bij een reis naar Indië zo dikwijls over de Indische Oceaan ziet zweven, moeten als typische dynamische cumuli beschouwd worden.

De losse stukken cumuli die af en toe voorbijtrekken, zogenaamde *fractocumuli* (plaat V*a*), behoren dikwijls bij geheel andere luchttoestanden. Het zijn de gewone begeleiders van slecht weer, onder een grauw dek van hogere wolken zien we ze voorbijjagen als het centrum ener depressie over ons heen trekt. Vestig uw aandacht op één dier vlokjes, en vraag u af of het aangroeit of oplost; daaruit kunt u afleiden in welk stadium der wolkenvorming u zich bevindt.

124. Cumulonimbus = onweerwolken (‘dondertorens’).[1] (Plaat VI*a*, VI*b*, VII*a*; fig. 50).

Geweldige wolkenmassa's met sterke vertikale ontwikkeling, die zich cumulusvormig als een gebergte of een toren verheffen,

1) Een typische beschrijving in Met. Zs. **47**, 236, 1930.

aan de bovenkant vezelig gebouwd zijn, dikwijls uitgerafeld in aambeeldvormige cirrusvezels. Omlaag zijn deze onweerswolken begeleid door een basis van fraktocumuli of fraktostrati, waaruit plaatselijk regen of hagel valt. Wolkenkenners beweren dat de regenbui neerkomt op het ogenblik dat de top van de cumulonimbus effener wordt en cirrusvezels ervan uitstralen.

De onderkant van de cumulonimbus of de onderkant van het cirrusscherm vertonen soms de *mammatus*-vorm: wolkenballen,

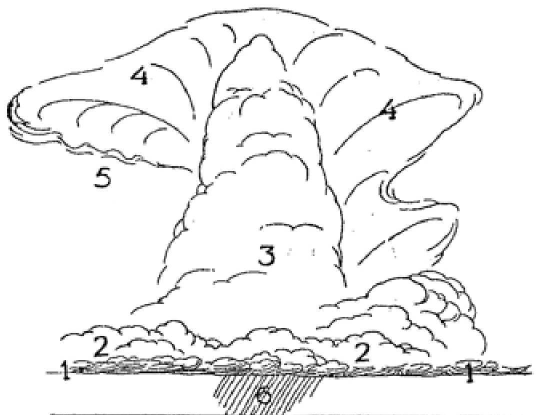


Fig. 50. Typische cumulonimbus, uit de verte waargenomen. 1. Grauwe rand van stratuswolken. 2. Cumuli. 3. 'Toren'; deze pulseerde, in een bepaald geval om de 11 minuten, in een ander geval om de 20 minuten groeiend en verdwijnend. 4. Cirrusscherm. 5. Mammatocumulus. 6. Valstrepen, neerslag. Naar J. Letzmann, Met. Zs. **47**, 236, 1930.

die van de donkere wolkenmassa in tepels naar beneden hangen en langzaam voortbewegen. Het is een zeldzame, vluchtige vorm, die meestal niet langer dan een kwartier zichtbaar is, en in de zomer onweer aankondigt.[1)]

De cumulonimbi zijn de wolkenfabrieken die grotendeels de wolken leveren, welke de achterkant van een depressie vormen. Hun bestaan wijst op een abnormaal grote temperatuur-gradiënt, want alleen dàn kunnen zulke ontzaglijke massa's over zo grote hoogten opstijgen.

1) Mammatus-vormen kunnen 's winters ook voorkomen bij gelijkmatige bewolking van stratocumuli in gebieden van hoge druk.

125. De verdeling der bewolking over een gebied van lage druk.

Als men de aanwijzingen van de barometer voor een groot aantal stations vergelijkt, vindt men dat over bepaalde grote gebieden lage druk heerst, over andere hoge druk. De gebieden van lage druk, ook wel *depressies* genoemd, of barometrische *minima*, bewegen betrekkelijk snel over het aardoppervlak, in 't algemeen van West naar Oost; zij zijn de gebieden van dichte bevolking, van sterke wind en neerslag, van 'slecht weer.' De gebieden van hoge druk of barometrische *maxima* blijven veel langer op dezelfde plaats, hebben dikwijls heldere hemel of

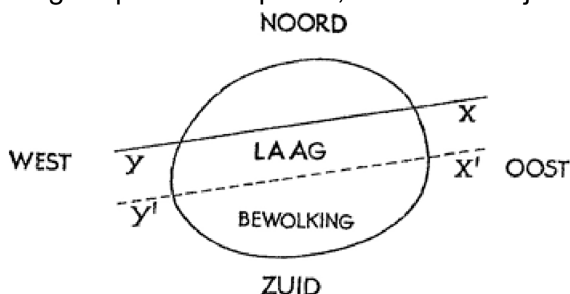


Fig. 51. Voorbijgang van een lage druk-gebied.

nevel, weinig wind en weinig neerslag. Op ieder van de weerkaartjes die dagelijks door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut worden uitgegeven en die men in de kranten overgenomen vindt, staan dergelijke gebieden door L (laag) en H (hoog) aangegeven.

Door veel waarnemingen te verenigen, heeft men gevonden, dat in een typisch gebied van lage druk de bewolking op een zeer stelselmatige manier verdeeld is. Wij hebben die schematisch voorgesteld in fig. 52. Voor het praktisch gebruik moeten we ons voorstellen, dat wij ons aanvankelijk ergens in X ten Oosten van het lage druk-gebied bevinden, en dat dit geleidelijk van West naar Oost over ons heen schuift (fig. 51). Wij bevinden ons dus achtereenvolgens op de verschillende punten van een lijn XY door het lage druk-gebied, en nemen achtereenvolgens de bewolking waar die met de verschillende delen van de lijn overeenkomt, tot we bij Y weer buiten de depressie gekomen zijn. Al naar gelang van de gevallen zal de baan, welke wij door het lage druk-gebied

afleggen, meer door het Noordelijke deel verlopen (XY), of door het centrale (X'Y'), of door het Zuidelijke; ze zal meer NO-ZW of meer ZO-NW hellen. De opeenvolging der wolkenvormen wordt daardoor bepaald.

Wacht tot het weerkaartje de aankomst van een duidelijk, goed gevormd lage druk-gebied aankondigt, leid uit het kaartje

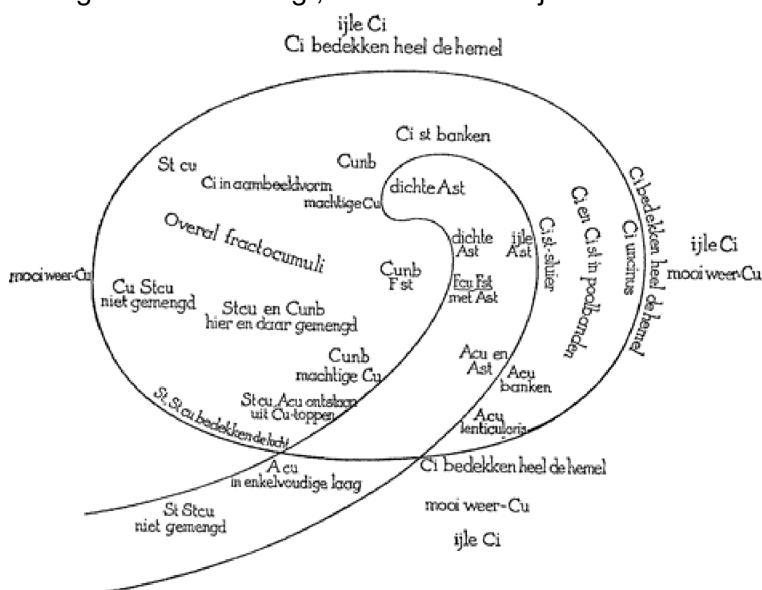


Fig. 52. Schematische voorstelling der wolkenvormen over een typisch lage druk-gebied. (Naar de Internationale Wolkenatlas, blz. 50.)

af, welk gedeelte van de depressie over ons schuift, en vergelijk de wolkenvormen die u waarneemt met het schema van fig. 52. Na enige oefening trachte men omgekeerd uit de waargenomen opeenvolging der wolken af te leiden in welk deel van de depressie wij ons bevinden.

Naar nieuwere opvattingen is zulk een lage druk-gebied een plaats, waar de warme lucht van Zuid-Europa wigvormig voor-

uitdringt in de koude lucht welke de N-pool en N-Europa omhult (fig. 53). De warme lucht stroomt van ZW naar NO, en glijdt over de koude luchtlaag heen, zonder zich ermee te vermengen, schuin naar omhoog ('aktief stijgen'). Aan de achterkant

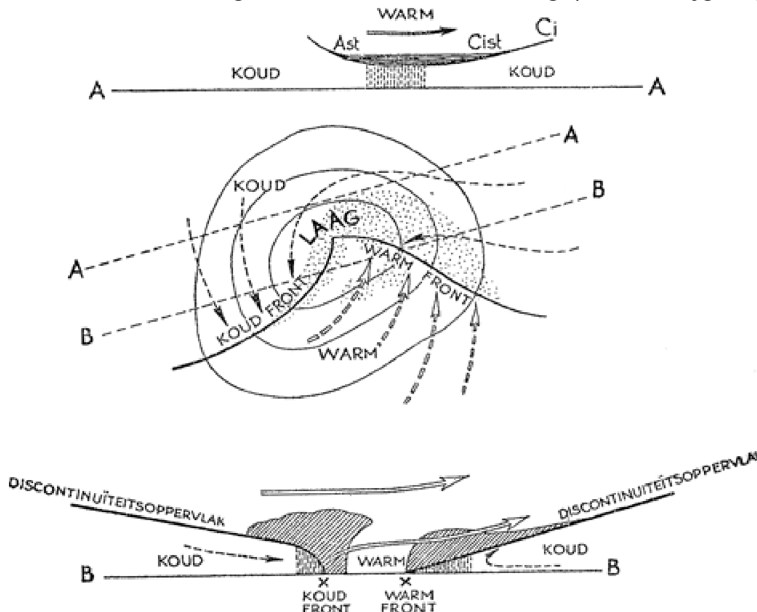
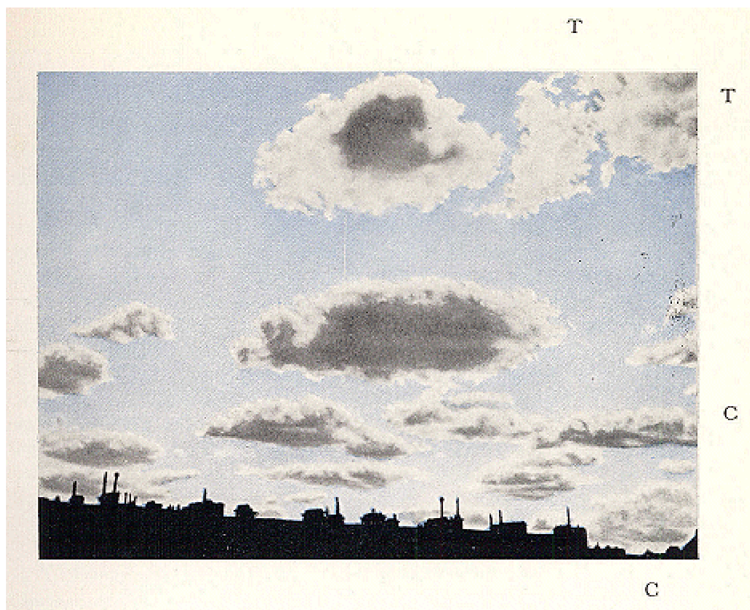


Fig. 53. Wolkenvorming aan het koude en aan het warme front van een lage druk-gebied. Onder en boven: dwarse doorsneden volgens AA en BB.

dringt de koude lucht van het NW vooruit, schuift onder de warme lucht en tilt haar op ('passief stijgen'). Zowel aan de vóór- als aan de achterzijde der warme luchtwig gaat het opstijgen gepaard met wolkenvorming; maar door de verschillende wijze van stijging en de anders gerichte luchtstromen kan men physisch begrijpen, waarom de wolken aan de twee fronten zo verschillend van vorm zijn.



PLAAT V*a*. Mooi weer-cumulus. De opname is in 't begin van de namiddag gemaakt, als deze wolken hun sterkste ontwikkeling hebben verkregen. Toch zijn ze nog ver van elkaar verwijderd en klein; nabij de horizon ziet men duidelijk, hoe gering hun hoogte is t.o.v. de breedte. Opvallend dun is de fraktocumulus bij T, die geen duidelijke basis heeft en onregelmatig begrensd is. Nabij C vertoont een wolk het begin van opwaartse ontwikkeling. Internationale Wolkenatlas, Pl. 73; opgenomen te Parijs.



PLAAT V*b*. Cumulus. Scherpe horizontale basis, duidelijke omtrek, toppen in bloemkoolvorm. Internationale Wolkenatlas, Pl. 79; opgenomen te Potsdam.

126. Wolkentaferelen.[1)]

De beschrijving van elke wolkensoort is slechts een hulpmiddel en een eerste begin, om de samenhang en de ontwikkeling der wolken te kunnen begrijpen. We geven thans enkele zeer vluchtige schetsen van typische wolkentaferelen, vooral om te laten zien van welk standpunt en met welke methode men een dergelijke studie kan aanpakken, die eigenlijk een wetenschap op zichzelf vormt. Eerst worden de hoge en gemiddeld hoge wolken beschreven, wier groeperingen kenmerkend zijn voor de plaats van de barometrische depressie waar men zich bevindt; zij moeten dus zoveel mogelijk in verband met het weerkaartje bestudeerd worden. Daarna worden de lage wolken beschreven, die veeleer afhangen van de aard van het terrein en zijn verwarming. Allerlei verschillende combinaties van lage wolken met hoge wolken komen voor, en het is de taak van de wolkenwaarnemer die te ontleden, en tegelijk toch ook als één typische toestand van de hemel aan te voelen.

***Hoge en gemiddeld hoge wolken*.**

1. *Hemel met* '*voorlopers*.' - De eerste aankondiging ener naderende depressie! Afzonderlijke Ci-wolken, die geen neiging tot samenvloeien vertonen.
2. *Voorzijde van typisch minimum* (Plaat I*a*). - De depressie nadert! Ci in vezels, banden, overgaand in Cist of Ast; kringen om zon en maan. Daaronder lossen de Cu-wolken en andere lagere wolken zich meestal op.
3. *Voorzijde van een afstervend minimum*. - Minder Ci; vooral gemiddeld hoge wolken, dikwijls Acu in mozaiek en in banden, met kransen om zon en maan. Lagere wolken: Cu of laagwolken, met neiging tot oplossen. Slecht zicht, heiïgheid.
4. *Zuidzijde of Noordzijde van een minimum* (Plaat III*a*). - Kleine, afzonderlijke banken van hoge en gemiddeld hoge wolken, b.v. Acu, dikwijls in lensvorm, onregelmatig, wisselend. Lagere wolken: cumuli en laagwolken.
5. *Centrum van typisch minimum* (Plaat III*b*). - Ast-sluier, overgaand in Nbst, onder urenlange regen; daaronder Frcu en vooral de struktuurloze Frst. Zeer vochtige lucht, meestal slecht zicht.
6. *Centrum van afstervend minimum*. De Acu wordt een melkachtige sluier van Ast; daaronder enkele onregelmatige Frst. Weinig regen, slecht zicht, zwakke wind.

1) Atlas international des Nuages, blz. 79 (Parijs 1932).

7. *Achterkant van een minimum* (Plaat VII*a*). - Onbestendig weer; afwisselend: helder met zeer goed zicht - dreigende wolken en buien. De gemiddeld hoge en de hoge wolken vormen geen gesloten sluier, ze zijn de bovenste delen van lage of gemiddeld hoge wolken. Onderscheid twee vormen.
   a. Typisch minimum: Cunb, omgeven door Cu met uitgerafelde randen; daarboven Ci met aambeeldvormen. Buien; elektrische verschijnselen, zij het ook zwak; diepblauwe opklaringen, goed zicht.
   b. Verzwakt minimum: weinige Cunb, omgeven door prachtige Cu ('marmeren bergen'), en verbonden door glanzende Acu. Windstoten zwak, dikwijls zonder buien; geen elektrische verschijnselen; weinig neerslag maar heiigheid. Tenslotte lange rollen van Stcu en zilverrand-Cumuli.

8. *Vóór het onweer*. - Betrekkelijk ondoorzichtige Ci, wazig, soms sluiers van Cist; tevens Acu castellatus (§118). Lager soms de mooi weer-Cu. Zeer zwakke wind.
9. *Onweerslucht* (Plaat VII*b*). - Chaotisch, overvuld met wolken; windstil, onbewegelijk, uitgezonderd gedurende het eigenlijke onweer. Zeer dichte Cist omhoog, op halve hoogte Acu van zeer verschillende vormen, omlaag Cunb met Fcu en Fst.

Lage wolken **(10-14 enkelvoudig, 15-17 samengesteld).**

10. *Matig sterke opstijgende luchtstromen: mooi weer-cumuli* (Plaat V*a*). - Deze toestand ontwikkelt zich bijvoorbeeld tussen twee minima. Cu met horizontale basis beginnen zich in de ochtend te vormen, verdwijnen 's avonds weer. Soms gaan de toppen der wolken over in een laag van Acu of Stcu.
11. *Sterke opstijgende luchtstroom*: *opeengestapelde Cu zonder Cunb*. - Deze toestand komt dikwijls voor aan de achterkant van minima die zich snel verplaatsen. Cu minder regelmatig gevormd, niet door Ci bekroond, met weinig dagelijkse periodiciteit. De bewolking is zeer wisselend.
12. *Zeer sterke opstijgende luchtstroom*: *opeengestapelde Cu met Cunb*. - Hetzelfde als nr. 11, maar hoge Cunb, die Ci-aambeelden dragen. Buien en opklaringen, kleine onweders.
13. *Turbulentielucht met laagwolken* (Plaat IV*a*). - Door de nachtelijke uitstraling vormen zich laaghangende velden van Stcu, St of nevel, die in de dag niet verdwijnen. Weinig of geen neerslag, maar vochtig. Onder de wolken hangt een ijle mist, vooral onder de centrale delen van 't wolkenveld. - Vooral 's winters, in gebieden van hoge druk.

14. *Turbulentielucht bij slecht weer*. - Onregelmatiger. Op gemiddelde hoogte hangen Ast of Cunb, waaruit het regent. Daaronder: Fst of Fcu, in min of meer gesloten laag.
15. *Laagwolken met mooi weer-Cu*. - Vormt zich: *a*. doordat een St-laag zich oplost, en de Fst overgaan in Fcu; *b*. doordat kleine Cu gevormd worden onder een reeds bestaande laag van Stcu.
16. *Laagwolken met opeengestapelde Cu*. - In een sterk opstijgende luchtstroom groeien de Cu tot aan de St-laag, doorboren die en groeien verder (dit laatste is allen van uit een vliegtuig te zien).
17. *Slecht weer-lucht met opeengestapelde Cu*. - Buiig weer. Fst of Fcu onder Cunb, soms in een samenhangende laag; de Cunb zijn dan niet meer waar te nemen, maar telkens ziet men de lucht donkerder worden en valt er regen.

127. Wolkenperspektief.

Holland.

Holland, gij hebt zwellende wolkenstoeten
uit verre hemel-velden aangevlogen,
gij hebt horizonnen, zacht omgebogen
van oost naar west, zonder eenmaal te ontmoeten

lijn die ze snijdt; en wijd-gespannen bogen
van stranden en van zeeën om ze henen
gaand tot waar zij met heemlen zich vereenen
die uw schijn van oneindigheid verhoogen.

De lijnen van uw land en van uw water
wekken in ons onpeilbare gedachten,
verlengen zich tot eindeloos begeeren.
Onze oogen proeve' iets groots en daarvan gaat er
een trek van grootheid door ons geestestrachten
en zijn wij thuis in grenzelooze sferen.

Henriëtte Roland Holst.
(*de Nieuwe Geboort*).

Een bijzonder mooi schouwspel krijgen we te zien als de hele lucht bedekt is met grote wolkenbanden, die van de ene naar de andere zijde van het uitspansel lopen; ze schijnen uit te stralen van een bepaald punt van de gezichteinder, en zich aan het tegengestelde punt weer te verenigen. Kijkt men naar een dezer uitstralingspunten, dan krijgt men de indruk van rechte, door een punt gaande lijnen; kijkt men loodrecht op die richting, dan meent men dat men de banden gebogen ziet.

In werkelijkheid zijn die 'poolbanden' *evenwijdig* en *recht*. Houd de rand van een stuk karton of een touwtje bij uw oog: u kunt die zo richten dat ze een wolkenband over zijn hele lengte bedekken. Let op de dakenlijn van een lange regelmatige huizenrij, op de randen van de stoep, op de telegraafdraden langs de weg, op de sporen van de trein: zij lopen alle evenwijdig aan elkaar, en schijnen toch net als de wolken van één punt uit te stralen en in het tegenovergestelde bijeen te komen. Twee fabrieksschoorstenen vertonen ons soms rookpluimen die *naar elkaar toe* schijnen te waaien! Het is louter perspektief, ze zijn in werkelijkheid evenwijdig (fig. 54).

Algemeen beginsel: alle lijnen, evenwijdig aan een bepaalde richting, schijnen altijd van één uitstralingspunt in de verte te

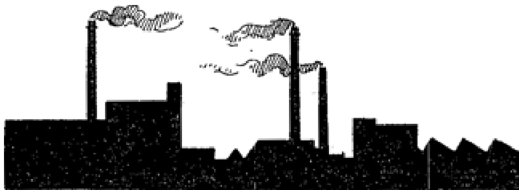


Fig. 54. Twee rookpluimen, die door perspektief naar elkaar toe schijnen te waaien. (De schoorstenen moesten veel lager, verder van elkaar getekend zijn.)

komen. De richting van uw oog naar dit uitstralingspunt is de richting van het hele stel.

Voorbeeld: bij het 'watertrekken' van de zon zien we een stralenbundel die schijnbaar naar alle richtingen uitstraalt van uit de plaats waar de zon zich bevindt. In werkelijkheid zijn al die stralen evenwijdig aan de richting oog-zon. - (Vgl. ook I, § 188).

Als de evenwijdige lijnen *horizontaal* zijn, ligt het uitstralingspunt *op de gezichteinder*. Beredeneer waarom! Bij de wolkenbanden is de richting naar dit punt tevens die van de wind.

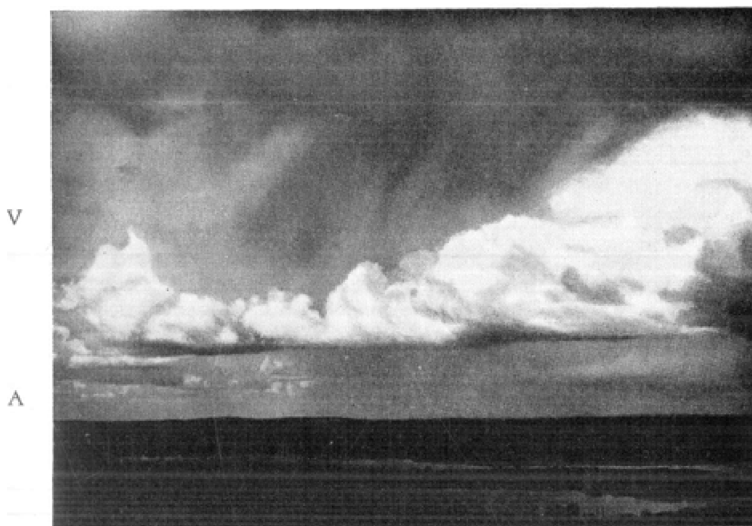
Het is erg nuttig zich de vorm van de wolkenbanden goed in te prenten, die eigenlijk grote cirkels aan de hemelsfeer zijn. Op een dag dat de wolken door de hemel zeilen moet u eens beproeven te voorspellen of een bepaald wolkje in de verdere loop van zijn baan over de zon zal trekken.

Nu kunnen we voor alle wolkenribbels en poolbanden gemakkelijk de ware richting aangeven: het is voldoende een potlood



PLAAT VI*a*. Cumulonimbus. Prachtig ontwikkeld aambeeld, sterke tegenstelling tussen de donkere, afgeronde cumulusvormen en de lichte, vezelige cirri bovenaan. Brengt hagel of onweer. Internationale Wolkenatlas, Pl. 90; opgenomen door Baker.

V A



PLAAT VI*b*. Cumulonimbus. Aan de achterzijde van een depressie, opklarend weer. De onderkanten waterpas, hetgeen op rustig weder wijst. De wolken zwellen op, maar vormen geen cirrusscherm. Dat we met een cumulonimbus te maken hebben, volgt uit het optreden van valstrepen (regen, hagel), die bij V de grond niet bereiken, bij A wel. Internationale Wolkenatlas, Pl. 85, opgenomen te Potsdam.

voor het oog te houden en ze daarmee als 't ware te verlengen tot waar ze de gezichteinder snijden. Dikwijls ontstaan eigenaardige perspektivische verschijnselen als de wolkenbanden zelf weer uit dwarse ribbels bestaan. In fig. 55 ziet men banden die van N uitstralen, dus alle de richting NZ hebben; band *a* bestaat uit ribbels, die evenwijdig aan de noordelijke gezichteinder zijn, dus (verlengd) de horizon in het O en W snijden en loodrecht zijn op de richting van de wolkenband. Band *b* bestaat uit ribbels die loodrecht schijnen op de richting van de band, maar in werkelijkheid

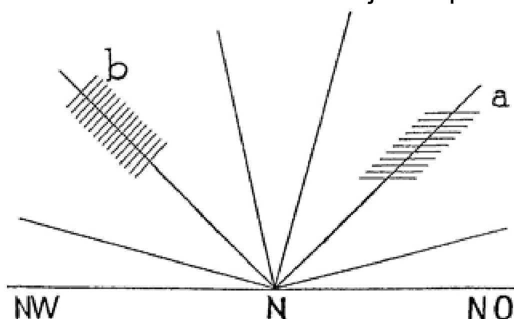


Fig. 55. Perspectief van poolbanden en wolkenribbels.

de gezichteinder in NW snijden, dus een hoek van 45° met de bandrichting vormen.[1)]

Geheel op dezelfde wijze vinden we de bewegingsrichting van wolken en wolkenribbels. Zijn de wolken vlak boven ons hoofd, dan heeft het perspektief geen invloed; zijn ze elders, dan moeten we hun bewegingsrichting verlengen tot die de gezichteinder snijdt.

Zowel bij het bepalen van de richting als van de beweging der wolken kan de wolkenspiegel ons helpen om veel vergissingen te voorkomen. Het instrument brengt op de eenvoudigst mogelijke wijze alle perspektiefeffekten vanzelf in rekening.

128. Wolkenribbels.[2)] (Plaat I*a*, I*b*, II*a*).

Ze komen voor bij allerlei verschillende wolkensoorten, veel bij hoge en middelhoge wolken (vooral Cicu, Acu), maar zelfs ook bij regenwolken op grijze achtergrond, en bij nevel die op

1) Deze voorbeelden naar Abercomby, Das Wetter (1894), blz. 84.
2) Das Wetter, **16**, 265, 1899. - Groneman en Nell, Hemel en Dampkring, **2**, 145, 1905.

de aarde rust. Bijna altijd ontstaan ze in gebieden van hoge druk, bij een barometerstand van 760 mm of meer.[1)]

Evenwijdige strepen in de wolken kunnen op drie verschillende wijzen ontstaan:

1e. Doordat twee luchtlagen over elkaar heen schuiven, dus op de manier van rimpelingen op een wateroppervlak waar de wind over strijkt. Soms ziet men een gelijkmatig betrokken lucht zich in rimpelingen onderverdelen; in andere gevallen vormen ze zich één voor één in de stralend blauwe lucht. Treffend is steeds het plotselinge van hun ontstaan, zodat men ze maar zelden op heterdaad betrapt!

2e. Of doordat de wind de wolken 'uitrekt,' als bijvoorbeeld de grotere druppeltjes iets lager zakken en daar door een snellere stroom worden meegevoerd, of als er sterke plaatselijke werveltjes in de dampkring voorkomen. - Alleen in het eerste geval wordt van wolkenribbels gesproken. Het zichtbare verschil tussen die twee typen is, dat bij het eerste ribbels met mooie symmetrische tussenruimten gevormd zijn, terwijl bij het tweede geen duidelijke periode te vinden is. Natuurlijk echter kunnen beide gevallen gecombineerd voorkomen: als bijvoorbeeld de eerst gevormde wolkenribbels door windverschillen worden uitgerekt (zeer duidelijk op plaat II*a*!). Geheel beslissend is alleen het waarnemen van de vorming: in het eerste geval groeien de strepen in de wolken loodrecht op hun eigen richting, in het tweede geval evenwijdig eraan.

3e. Volgens moderne onderzoekingen kunnen regelmatige, lange wolkenrollen ook ontstaan, wanneer de dampkring in labiel evenwicht verkeert, doordat de onderste lagen te warm zijn en neiging hebben op te stijgen; er zouden zich dan veelhoekige 'cellen' vormen, in elk waarvan de lucht in 't midden opstijgt en aan de randen daalt. Maar de wind, van snelheid veranderend met de hoogte, oefent een afschuivingskracht op dit cellenstelsel uit, en vervormt ze tot lange cilinders.[2)] Door waarneming van de windsnelheid en de temperatuur op verschillende hoogten, kan men in beginsel dit geval van de vorige onderscheiden.

De schijnbare grootte α van de wolkenribbels is gemakkelijk in hoekmaat te schatten, b.v. door vergelijking met de middellijn van Zon of Maan. Soms is het slechts 0,02 rad (= 1°), in andere gevallen (bij storm) zijn de ribbels zo groot dat enkele reeds het gehele uitspansel bedekken. Kan men de afstand A schatten

1) A. Bracke, Hemel en Dampkring, **1**, 280, 1903.
2) D. Brunt, Physical and dynamical Meteorology, blz. 215 (Cambridge 1935). - Süring, die Wolken, blz. 76.

uit de wolkenvorm, dan heeft men hiermee de ware grootte $\lambda = \alpha$ A. De metingen geven golflengten van 50 tot 2000 m, met een uitgesproken maximum bij 450 m en hoogten tussen 3000 en 6000 m.

De golfjes zijn zelden geheel symmetrisch, meestal is de kant die vooruit beweegt dunner dan de achterzijde. In iedere ribbel overweegt de heldere band, terwijl de donkere tussenruimte veel smaller is; men heeft hierin een tegenstelling willen zien met watergolven, waaraan men meest een smalle heldere streep ziet (golfberg) en een brede donkere tussenruimte (golfdal): dit verschil is echter slechts aan bijkomstige optische omstandigheden toe te schrijven. De wolkenribbel ontstaat, doordat bijvoorbeeld een koude droge laag over een warme, vochtige laag schuift (fig. 56); het grens- oppervlak rimpelt zich, en waar de

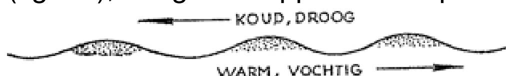


Fig. 56. Het ontstaan van wolkenribbels.

vochtige laag in de koude laag dringt ontstaat condensatie en vormt zich een wolk. Als de ribbels zelf weer dwars gestreept zijn, is dit soms omdat ze door de wind worden uitgerekt (plaat II*a*), andere malen omdat er werkelijk een tweede dwarse golvenstelsel op het eerste gesuperponeerd is (plaat I*b*).

Waardoor de golflengte λ bepaald wordt is niet met volkomen zekerheid te zeggen. Met verschillende vereenvoudigende onderstellingen vonden Helmholtz en Wien:

$$a_1^2 s_1 + a_2^2 s_2 = \frac{g\lambda(s_2 - s_1)}{2\pi},$$

waarin a_1 de snelheid der golven is t.o.v. de bovenlaag, a_2 t.o.v. de benedenlaag, s_1 en s_2 de dichtheid der bovenste en der onderste laag. Nu is het duidelijk dat de golven meegevoerd zullen worden met een snelheid tussen die der twee lagen in; stel eens: met de gemiddelde hunner snelheden, dus $a_1 = a_2 = w/2$, waarin w de snelheidssprong voorstelt. Dan wordt:

$$\lambda = \frac{\pi w^2}{2g} \frac{s_1 + s_2}{s_1 - s_2} = \frac{\pi w^2}{g} \frac{T}{\triangle T}.$$

Als de meteorologen met vliegtuigwaarnemingen de grootheden die in deze formule voorkomen bepalen, vinden ze meestal dat de berekende golflengte groter wordt dan de waargenomen

golflengte. Dit schijnt te wijten aan de samendrukbaarheid der lucht,[1] die bij de hoger aangehaalde formules verwaarloosd was; hiervoor verbeterde waarden vindt men in volgend tabelletje:

w **=**	**2**	**6**	**10**	**18 m/sec.**
Δ T = 10°	30	300	750	2050
6°	60	450	1100	2500
0°	150	850	1600	2900

Juist zoals we de wolkensnelheid hebben afgeleid uit een schatting der wolkenhoogte, kunnen we nu ook de golflengte der ribbels bepalen; men ziet dat zelfs een ruwe meting voldoende is om met tamelijke zekerheid de snelheidssprong *w* af te leiden, die praktisch weinig van ΔT afhangt.

En door nu weer de kennis van deze snelheidssprong te combineren met de waarneming van richting en

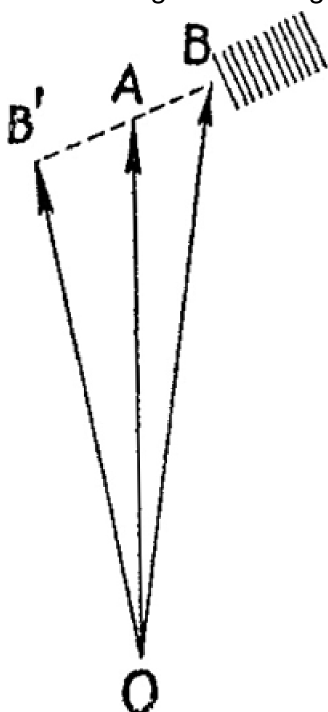
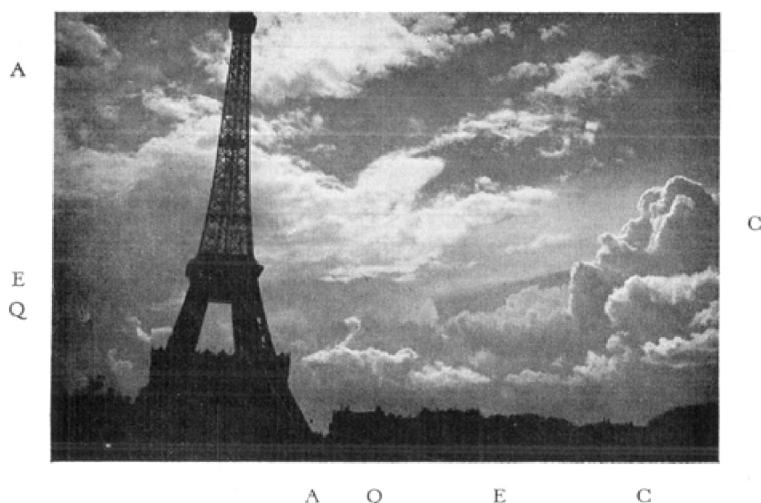


Fig. 57. Benedenwind, bovenwind, en richting der wolkenribbels.

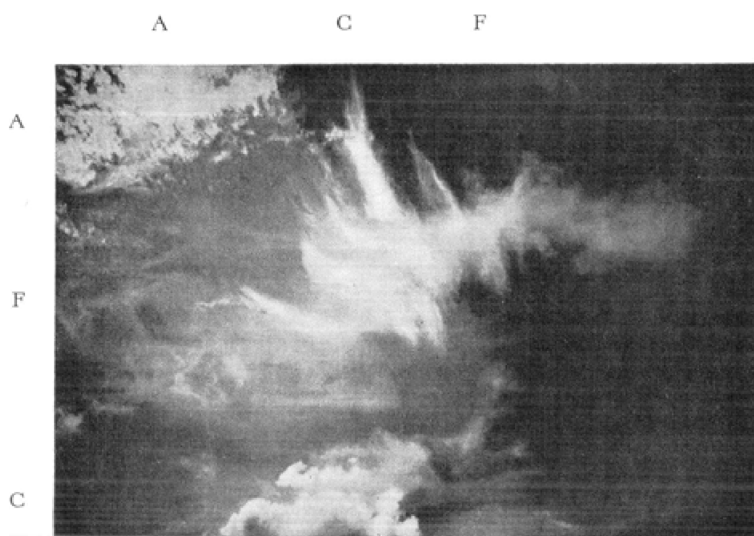
beweging der ribbels, kan men onmiddellijk belangwekkende aanwijzingen vinden omtrent de toestand der twee lagen die over elkander glijden.[2] Stel OA is de bewegingsrichting van de onderste, OB die van de bovenste, dan is hun relatieve snelheid AB, en de ribbels staan loodrecht daarop (fig. 57). In 't algemeen is de verandering van richting of snelheid van de ene tot de andere laag gering, OA en OB liggen dicht bij elkaar, en de ribbels worden ongeveer in een gemiddelde richting meegevoerd. Wanneer de twee lagen alleen in 't bedrag der snelheid verschillen, niet in richting, drijven de ribbels dus loodrecht op hun eigen richting; wanneer de lagen snelheden van gelijk bedrag hebben, maar verschillend gericht, drijven ze in

1) B. Haurwitz, Met. Zs. **48**, 483, 1931. Vgl. ook Wegener, Beitr. z. Phys. d. freien Atm. **4**, 23, 1911.
2) Wegener, Beitr. z. Phys. d. freien Atm. **2**, 55, 1906.

hun eigen richting. Meestal vindt men, dat de lagen zich zowel door het bedrag als door de richting der snelheid onderscheiden, en dat de ribbels in schuine richting bewegen.



PLAAT VII*a*. Achterkant van een typisch minimum. Bij A, altocumulusflarden. Bij Q, cumulonimbus, met zijn cirrus-aambeeld in E. Bij C, snelgroeiende cumuli. Af en toe regenbuien. Internationale Wolkenatlas, Pl. 150; opgenomen te Parijs.



PLAAT VII*b*. Onweerslucht. Het onweerachtige karakter der wolken herkent men aan de dichte cirri (F), de schuimachtig verdeelde altocumuli (A). Dat het de achterkant van het onweder is, blijkt uit het gelijktijdig voorkomen van hoge en gemiddeld hoge wolken, alsook uit de groeiende cumuli (C). Internationale Wolkenatlas, Pl. 163; opgenomen door Quenisset.

Daar men de benedenwind OA kent uit de beweging der wolken, en daar men ook de richting der ribbels waarneemt, kan men de lijn AB trekken, en die een lengte geven overeenkomend met de berekende snelheidssprong *w*. De bovenwind moet dan voorgesteld zijn door een pijl OB. Er is nog keuze mogelijk tussen OB en OB', maar in 't algemeen draait de wind in hogere lagen meer naar rechts, en zal men dus OB de voorkeur geven.

129. Afzonderlijke lange wolkenstrepen.[1)]

Te midden van de helderblauwe lucht ziet men soms een heel lange witte wolkenstreep, dikwijls niet breder dan een paar graden, en die door geen andere dergelijke strepen begeleid wordt. Zulke gevallen zijn nog veel te weinig opgemerkt en bestudeerd. Men onderstelt, dat de wolk de aanwezigheid verraadt van een lange wervel met horizontale as; maar slechts een uitvoeriger onderzoek zou kunnen aantonen of deze verklaring in een bijzonder geval of in het algemeen juist geacht kan worden.

130. De invloed van de aarde op de wolkenvorming.

In verscheidene gevallen blijkt de bewolking af te hangen van de geaardheid van de grond. Ziehier enkele voorbeelden.

Over uitgestrekte wouden hangen de wolken lager dan elders; door de sterkere verdamping wordt de lucht vochtiger, en bereikt de opstijgende luchtzuil sneller het dauwpunt.

Cumuli en cumulonimbi vormen zich soms over het land aan beide kanten van een zeeëngte, terwijl over de zee zelf de hemel blauw blijft, en de schepen als door een geweldige wolkencorridor varen (vgl. § 123).

Bijzonder fraai is de cumulusvorming boven onze Noordzeeeilanden.[2)] Op warme zomerdagen wordt het eiland veel sterker verhit dan de omringende zee, en stijgt een zuil hete lucht op, waarin zich weldra een cumulus vormt; de gehele vorm van het eiland is in de omtrekken van de wolk terug te vinden (fig. 58)!

Luchtvaarders hebben soms een soort afbeelding van de aardse rivieren in de wolken gezien;[3)] vlak boven de waterlopen waren er namelijk onderbrekingen, die er donker uitzagen, temidden der heldere wolkenlaag. Het is langzamerhand gebleken dat

1) P.M. van Riel, Hemel en Dampkring, **24**, 105, 1926.
2) M. Pinkhof, Hemel en Dampkring, **34**, 252, 1936.
3) Illustrierte aeronautische Mitt. **9**, 12, 1905.

dergelijke afbeeldingen vrij veelvuldig voorkomen, zodra de wolkenlaag uit rustige, losse cumuli bestaat. In sommige gevallen was die afbeelding ook van de aarde uit te zien.

Boven een vijver in een bos zweefde een wolk op 80 m hoogte; enkele kleinere bevonden zich boven een naburige beek. Deze wolken bewogen niet met de wind mee maar bleven bestendig



Fig. 58. Cumulusvorming boven Ameland, 19-7-1935. Strand bij het dorp Nes. Naar J.A. Pannekoek, Hemel en Dampkring, **34**, 254, 1936.

op hetzelfde punt. In een ander geval was het een reeds gemaaide weide, omringd door hoog gras, die sneller verdampte dan de omgeving, en daardoor voortdurend een mistzuil droeg.

Ook boven een grote stad verschijnen dikwijls bijzondere wolkenvormingen, daar er een stroom hete lucht van de door de zon geblakerde huizenmassa opstijgt, tevens grote zwermen condensatiekernen meeslepend.[1] Het effekt is verschillend, al naar gelang van de toevallige temperatuur- en vochtigheidstoestanden: nu eens verschijnt boven de stad één grote wolk, onveranderlijk van plaats te midden van de blauwe hemel; een andere maal wordt een effene wolkenlaag juist door de warme luchtstroom boven de stad opgelost.

1) A. Kratzer, Das Stadtklima (Vieweg 1937).

131. Wolkenvorming aan vliegtuiggassen.[1)]

Op een zomernamiddag waarop cumuli zich aan 't vormen zijn, is het wel eens voorgekomen dat een vliegtuig aanleiding gaf tot wolkenvorming in zijn spoor. Deze gevallen zijn echter zeldzaam, de toestand van de dampkring moet reeds uiterst labiel zijn; men bemerkte, dat de condensatie zich vooral vertoonde in de omgeving der stapelwolken, alsof dáár de lucht oververzadigd was met waterdamp. Een dergelijke wolkenvorming is ook wel waargenomen op de hoogte der cirruslaag. Het zijn de verbrandingsgassen van het vliegtuig die de nodige wateraantrekkende stofdeeltjes en ionen leveren, welke als kernen voor de condensatie dienen. (§ 96, 123; vgl. ook 107).

132. De Maan en de Wolken.

‘Op de Antillen hebben we bij volle Maan altijd opgemerkt, dat de fraktocumuli die over het zenith trekken en de maanschijf gaan bereiken onmiddellijk verdwijnen alsof ze vervluchtigd waren of door de inwerking van de warmte gesmolten.’ (Poey, Comment on observe les Nuages, blz. 144). - Zo schreef een der onbetrouwbaarste waarnemers die ooit de natuur hebben beschreven! Het is geheel en al onzinnig:

1. omdat de warmte die de Maan geeft, zó gering is, dat men ze zelfs met de allergevoeligste toestellen ternauwernood aantonen kan;
2. omdat de straling van de Maan alle wolken van de wolkenlaag treft, en niet alleen die welke zich toevallig vóór mij in de richting van de Maan bevinden;
3. omdat de wolk die ik *naast* de Maan zie, door een ander waarnemer, die enige kilometers verder woont *vóór* de Maan wordt waargenomen.

Toch bestaat er een algemeen verspreid volksgeloof, dat de Maan de wolken zou wegdringen. Dit vindt waarschijnlijk zijn oorsprong in het nuchtere feit, dat de Maan slechts zichtbaar is wanneer daar ter plaatse geen wolken voorkomen! Een werkelijke invloed van de Maan op de wolken is zelfs door de uitvoerigste en nauwkeurigste statistieken niet aangetoond kunnen worden.

1) Hemel en Dampkring, **7**, 58, 1919. - Met. Zs. **45**, 349, 1928. - Wetter **47**, 35, 1930. - Insgelijks is op vliegvelden waargenomen hoe een vliegtuig soms bij het landen of starten grondnevel vormt, in andere gevallen de nevellaag doet verdwijnen. Zie Zs. angew. Met. **54**, 61 en 307, 1937.

Neerslag.

Het regent als het regenen wil,
Het regent al maar meer,
En als 't genoeg geregend heeft ....
Welnu, dan wacht het weer.

Goethe.

133. Aanslag op de ruiten.

In de herfst en in de winter vindt men 's ochtends bij het opstaan dikwijls dat de ruiten onzer slaap- en woonkamers met een dof aanslag bedekt zijn. Kijk door een vergrootglas en overtuig u ervan dat het uit ontelbare kleine waterdruppeltjes bestaat. Wrijf het weg met de vinger om zeker te zijn dat het aan de *binnen*kant zit. - De verklaring is eenvoudig: de lucht in de kamer is warm en kan dus veel waterdamp opnemen (uitgeademde lucht, koken van eten, enz); als het buiten koud wordt, koelt de kamerlucht in de nabijheid der ruiten af, en de waterdamp slaat neer. Hieruit begrijpt men ook dat het aanslag vooral verschijnt op de ruiten van kamers waar gestookt wordt, maar dat het bij *flink* stoken tenslotte verdwijnt.

In de trein kunnen we dikwijls hetzelfde verschijnsel waarnemen. Het is opvallend hoe de ruitjes van een wagon vrijwel plotseling en *alle tegelijk* beslaan, blijkbaar op het ogenblik dat de reizigers voldoende waterdamp hebben uitgeademd om de lucht bij de ruiten te verzadigen; of als er op een warme dag ineens een onweersbui losbarst, met koude regen en plotselinge afkoeling van de ruiten.

Bij de ramen van onze huizen vormt zich het aanslag altijd het sterkst *aan de benedenkant*; waar het raam uit afzonderlijke ruitjes bestaat, geldt dit ook voor elk ruitje in het bijzonder. De verklaring is, dat de vochtige, warme lucht van de kamer door aanraking met de koude ruit afkoelt, zwaarder wordt, en naar beneden stroomt; haar vochtigheidsgraad neemt toe, tot het dauwpunt bereikt is en de waterdamp neerslaat. Als er latjes zijn tussen de ruitjes, vormen zich wervels, een bij elk ruitje, en brengt

iedere wervel een nieuwe voorraad vochtige lucht aan, die aan de onderkant van het ruitje neerslaat (fig. 59).[1]

Een raam dat aan de binnenkant bedekt is door een gordijn of een luik, bedauwt 's winters

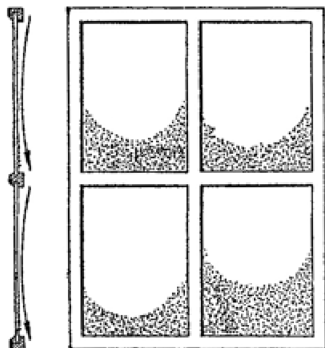


Fig. 59. De vorming van aanslag op de ruiten onzer huizen.

meer dan een onbedekt raam; het aanslag is sterker of zwakker, naarmate de golvende gordijn dichter bij het glas of verder er vandaan komt. Het gordijn maakt dat het raam geen straling krijgt uit de warme kamer, en vooral, dat de lucht die bij het raam afgekoeld is niet snel door nieuwe vervangen wordt. Om die reden blijft de ruit merkbaar kouder dan een onbeschermde, en zal dus sterker bedauwen. Een thermometer die men tegen het glas houdt wijst dikwijls een paar graden lager dan bij een onbeschermde ruit.[2]

's Zomers is het verschijnen van aanslag op de ruiten veel verandelijker; ze kunnen de ene maal aan de binnenzijde, de andere maal aan de buitenzijde beslaan.

134. Uitslag.

Als een lange periode van matige vorst ineens gevolgd wordt door een warm en vochtig dooiweer, vertonen de stenen muren, de marmeren muurbekledingen en vooral de vertikale wanden een aanslag van water. De muren hebben een te grote ‘warmtecapaciteit’ om de plotselinge temperatuurverandering te kunnen volgen en blijven nog geruime tijd kouder dan de lucht. De mensen zeggen dan dat ‘de muren zweten.’ Die uitdrukking wijst op een volkomen onjuiste opvatting: het water dat neerslaat, komt geheel uit de lucht, en niet uit de stenen! (Hier is er dus een zekere tegenstelling met de ontstaanswijze van dauw; zie § 166).

1) Bentley beweert, dat er door de spleten tussen het raam en het kozijn koude buitenlucht naar binnen dringt, naar beneden stroomt, zich gaandeweg met de vochtige lucht van de kamer mengt en tenslotte de damp doet neerslaan. Deze verklaring lijkt mij onhoudbaar. Neem proeven!
2) Wells, Essay on Dew (London, 1814).

135. Meting van de hoeveelheid regen.

Zet een blikken busje of een gewoon drinkglas buiten in een regenbui; en schat bij het einde van de bui hoe diep de waterlaag is, die zich in het glas verzameld heeft; het is verrassend weinig! Als het glas een tweemaal groter oppervlak had, zou er tweemaal meer water in gekomen zijn, maar dat had zich over een tweemaal grotere bodem moeten verdelen; de diepte zou dus dezelfde gebleven zijn. Daarom kunnen we de regenval aangeven *in millimeters* per dag.

Het laagje regenwater in ons glas is te ondiep om het goed te meten, en in de loop van de dag verdampt er voortdurend water uit. Dit bezwaar vermijden

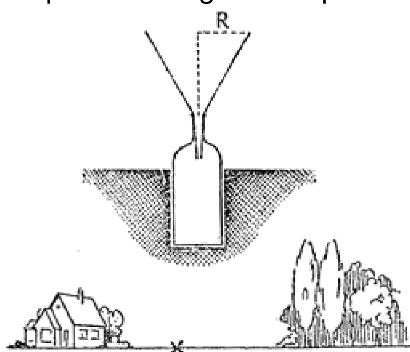


Fig. 60. Het opstellen van een eenvoudige regenmeter.

we, door een trechter in de hals van een fles te plaatsen (fig. 60). Kan men zorgen dat onze *regenmeter* op een hoogte van ruim 1 meter opgesteld wordt, des te beter; zo niet, dan graaft men hem in de grond, tot bijna aan de hals. Men kiest bij voorkeur een plekje van een grasveld, dat enigszins tegen wind beschut is door bomen of huizen, maar tenminste evenver van deze voorwerpen verwijderd als ze hoog zijn. In de stad kieze men het kleinste kwaad en stelle de regenmeter op het dak.

Lange tijd heeft men er zich over verbaasd, dat de regenmeters des te minder regen aanwezen, naarmate ze hoger geplaatst waren, en men was al gaan onderstellen dat de regen, op zijn weg, voortdurend in sterkte aangroeide door nieuwe condensatie. Nu weet men dat daar niets van aan is: maar naarmate de regenmeter hoger staat is hij aan sterker wind blootgesteld, en vormen er zich meer wervels om de trechter, zodat een deel van de regen niet in de fles terecht komt! Vandaar de keuze van ons waarnemingspunt.

De trechter vangt de regen op over een oppervlak πR^2 (R = straal van de trechterrand in cm). Na 24 u. meten we met een

cylindrisch maatgals hoeveel cm^3 water zich in de fles verzameld hebben. De regenval in cm is

$$\frac{\text{dit volume}}{\text{oppervlak } \pi R^2},$$

en de regenval in mm is 10 maal groter.

Bepaal de hoeveelheid regen die bij een bui valt, en vergelijk die met het water dat u gebruikt om uw tuin te begieten. Voorbeeld: 1 gieter van 15 liter op 10 m^2 komt overeen met een regenval van 1,5 mm (een behoorlijke regenbui). Onder een sproeiende tuingieter krijgt de grond *per sekunde* een neerslag van een paar millimeter. Bepaal dit met de regenmeter! - Dit is honderd maal meer dan wat de heftigste tropische regenbuien leveren, waarvan de leek ten onrechte beweert dat het water 'met emmers' neerstroomt.[1)]

Uit de hoeveelheid regen die per uur valt kunnen we berekenen hoeveel er per sekunde neerkomt; en uit de valsnelheid, welk breukdeel van de lucht met water gevuld is. Stel 3,6 mm per uur (een flinke bui!); dit is ongeveer 0,001 mm per sekunde. Laat de valsnelheid 400 cm/sec zijn; als dus de gehele waterinhoud van een 4 meter dikke luchtlaag neervalt, wordt de aarde bedekt met een waterlaagje van 0,001 mm.

Dus is het breukdeel 0,0001:400 = 0,0000003 van de lucht met water gevuld: nog geen miljoenste!

Om zonder langdurige statistieken een denkbeeld te krijgen van de totale hoeveelheid regen die b.v. in een maand (of in 3 maanden) valt, stellen we een regenmeter op, maar brengen er eerst een laagje van 5 mm water in, bedekt met 5 mm olijfolie. De verdamping is nu zeer gering, en we kunnen het instrument wel een maand of langer laten staan.

Willen we integendeel onderzoeken hoeveel regen er bij één enkele bui valt, dan moeten we onze regenmeter gevoeliger maken, door het glas waarin de regen zich verzamelt smal te kiezen en fijn onder te verdelen.

136. Regen in het bos.

Regent het onder de bomen werkelijk minder dan daarbuiten? Bij 't begin van een bui stellig! Maar weldra treedt een stationaire toestand op: de bladeren laten weer evenveel regen afdruipen als ze krijgen. Toch blijft er nog altijd een verschil, doordat een deel van de regen langs de stammen der bomen afgevoerd wordt.

1) Sitzungsber. Akad. Wien, **104**, 1397, 1895.

Bij een flinke bui kan men bijvoorbeeld bij beukebomen mooi waarnemen hoe elke stam een plas om zich heen krijgt, gemiddeld des te groter naarmate de boom groter is.

Sommige bomen hebben een zodanig bladerenstelsel, dat de regen vooral naar de buitenkant van de kroon wordt afgeleid en daar afdruipt; andere voeren meer naar de stam toe ('centrifugale' en 'centripetale' afvoer). Uitgesproken centrifugaal zijn b.v. de platanen: ze maken den wandelaar behoorlijk nat!

Vergelijk de aanwijzingen van twee regenmeters, een in 't bos en een daarbuiten. Gemiddeld over 't hele jaar bleek in een bepaald geval dat de neerslag in 't bos 75% was van die daarbuiten.

Bij dichte nevel hoort men in het bos aan alle kanten het getik der vallende waterdruppels, gevormd door nevel die op de bladeren tot grotere druppels is verenigd. De regenmeter wijst een merkbare neerslag aan, terwijl hij buiten het bos niets opvangt. Zo kan in sommige landen de plantengroei een groot gedeelte van de nodige hoeveelheid water uit de nevel halen.

137. Plasregens en wolkbreuken.

Het meten van de hoeveelheid regen die tijdens een zeer zware bui kan vallen, heeft praktisch belang voor de aanleg van rioleringen, en theoretisch belang voor het begrijpen van het ontstaan dezer regenverschijnselen.

Een 'plasregen' moet gedurende tenminste 5 minuten een neerslag van tenminste 0,3 mm per minuut brengen. Als er binnen 't half uur meer dan 50 mm gevallen is, spreekt men van een 'wolkbreuk.'

Bij zulke hevige regens schijnt er verband te bestaan tussen de regenval en de tijdsduur van de bui:[1)] regenval in mm = 6,5 √ tijd in minuten.

Een regenbui van 9 minuten b.v. kan bij de 20 mm regen brengen, gemiddeld ruim 2 mm/min. Dit bedrag wordt slechts zelden bereikt, het is een soort maximum-wet. Een 'normale' regenbui is veeleer van de orde 2 √ tijd.

Vergelijk dit met de beruchte tropische regenbuien! Een der zeer sterke buien te Buitenzorg bracht 7,2 mm in 8 minuten, dus slechts 0,9 mm/min. De plasregens in de tropen zijn niet sterker dan bij ons, maar ze duren langer.

In Nederland is per etmaal van 24 u eens een regenval van

1) Köppen, Wetter, **21**, 169, 1904.

109 mm waargenomen (1877), van 117 mm (1918), en van 125 mm (1915).[1] Men beweert dat er in 1920 te Westerwolde 500 mm in 5 uur viel, maar dit is niet met een regenmeter gecontroleerd.[2]

De vraag is nu, hoe dergelijke wolkbreuken ontstaan. Als *de hele dampkring* op een warme zomerdag met waterdamp *verzadigd* was, en alles neersloeg, zou er een laag van 35 mm ontstaan. Maar dikwijls valt er in korte tijd veel meer regen. Dat is dus slechts mogelijk als er uit de hele omgeving vochtige lucht wordt toegevoerd, en zo begrijpt men dat dergelijke sterke regens slechts *plaatselijk* kunnen optreden.

Bij 'wolkbreuk' denkt men onwillekeurig aan het neervallen van een wolk. Maar ook de dichtste en dikste wolk zou nauwelijks 20 mm neerslag brengen. We moeten ons veeleer voorstellen, dat bij gewone regen de lucht boven ons opstijgt met een snelheid van bijvoorbeeld 0,10 m/sec. Door dit opstijgen koelt ze af, de waterdamp condenseert en vormt druppeltjes; zodra die een bepaalde grootte bereikt hebben (b.v. 0,05 mm), vallen ze al sneller dan de lucht opstijgt, en de regen begint. Bij wolkbreuken echter is de snelheid van het opstijgen wel 8 m/sec en meer. *Nu kunnen geen druppels meer vallen*: die welke zo groot zijn dat ze de luchtweerstand zouden kunnen overwinnen, worden door de snelle luchtstroom stukgeblazen en in kleinere druppeltjes verdeeld, die toch weer meegesleept worden. Zo worden al de druppels als één grote watermassa met de luchtstroom meegenomen, tot ergens in de hoogte de luchtstroom zich zijdelings uitbreidt, de stroomsnelheid vermindert, en de gehele massa blijft hangen en zich accumuleert. Een plotseling afnemen van de stijgende beweging, en het water valt: ziedaar de wolkbreuk aan de gang!

138. Valstrepen.[3] (Plaat VIb; fig. 61).

Als bij buiig weer de wolken over 't wijde land zeilen, zien we soms in de verte onder één van hen een grijze sluier die in plooien schijnt af te hangen. Daar regent het! De grijze sluierplooien zijn de 'valstrepen': het is niets anders dan regen, van verre gezien.

Als de wolk en de lucht daaronder even snel bewegen, zijn de valstrepen vertikaal. Meestal echter ziet men ze hellen: de

1) Hemel en Dampkring, **16**, 90, 1918.
2) Hemel en Dampkring **18**, 47, 1920.
3) W. Schmidt, das Wetter, **35**, 136, 1918.

onderzijde blijft achter, beweegt niet zo snel als de wolk; blijkbaar is de windsnelheid geringer dicht bij de Aarde, en neemt geleidelijk in de hoogte toe. De druppels wrijven tegen de lucht bij het vallen en bereiken weldra een grenssnelheid *c* in vertikale richting; maar ze worden ook meegevoerd door de horizontale windstroming op elke verschillende hoogte, en nemen al heel snel de horizontale snelheid daarvan over. Wanneer al de lucht onder de wolk met dezelfde horizontale snelheid bewoog, zouden de valstrepen vertikaal zijn; wanneer echter een laag een horizontale

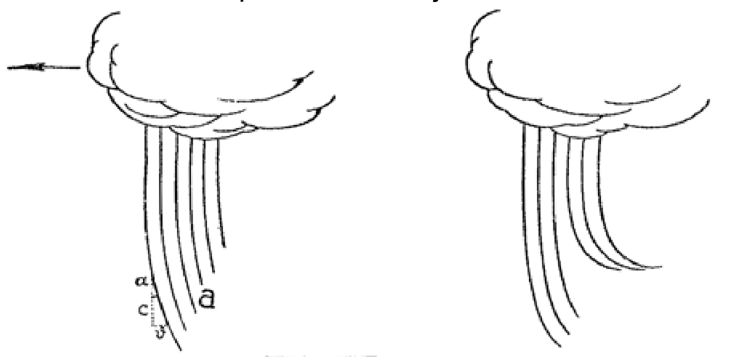


Fig. 61. Een regenbui in de verte, waarvan wij de valstrepen waarnemen. Rechts: hoe de valstrepen er *niet* uitzien.

snelheid *v* ten opzichte van die der wolk heeft, wordt de helling der valstrepen in die laag: $tg\ \alpha = v/c$. Als men *c* kent, die van de grootte der druppeltjes afhangt, kan men uit de helling van de valstrepen onmiddellijk zien, hoe de windsnelheid met de hoogte verandert. Alleen al het feit dat wij de valstrepen betrekkelijk scherp zien, bewijst dat de regendruppels niet zo erg verschillend van grootte zijn, want anders moesten *c* en dus ook de helling α voor elke soort druppels weer anders zijn. Neem gemiddeld c = 4 m/sec, en schat hoeveel langzamer de wind nabij de grond is dan op de hoogte van de wolk (uit de waarde van α onderaan). Let op alle bochten die in de valstrepen voorkomen!

Soms ziet men valstrepen die niet tot aan de grond reiken maar halverwege ophouden (fig. 61 bij *a*). Is dat een teken dat

de regendruppels al onderweg verdampen en verdwijnen? - Neen! Want naarmate ze kleiner worden, moesten ze langzamer vallen, meer met de wind meegevoerd worden, en de valstrepen zouden moeten ombuigen en aan hun uiteinde bijna horizontaal worden. Dat ziet men nooit! Wanneer dus de valstrepen halverwege eindigen, heeft dat een heel andere oorzaak: n.l. *dat het vallen van de regen daar pas begonnen is.* Vergeet niet, dat regendruppels die met een snelheid van 4 m/sec van 1000 m hoogte vallen, daar 250 sec over doen, dus meer dan 4 minuten! De wolk is zover van ons verwijderd, dat de valbeweging ons uiterst langzaam voorkomt. Wacht enige minuten en kijk of die valstrepen niet voortdurend langer worden en tenslotte de grond bereiken.

139. Het spatten van regendruppels.

Bij zachte regen maken de druppels slechts zelden blaasjes, waar ze in een waterplas vallen. Waar er bomen staan ziet men die blaasjes echter wel: de druppels die van de bladeren vallen zijn heel wat groter dan de gewone regendruppels; hoor hoe het zachte geruis op uw paraplu vervangen wordt door luide tikken op het ogenblik dat u onder 't geboomte komt.

We weten nog betrekkelijk weinig van de omstandigheden die bepalen, of een waterdruppel die in water valt al of niet tot de vorming van een luchtbel aanleiding geeft.[1)] Momentopnamen van vallende druppels hebben aangetoond, dat het water opspat als een soort bekervormige krater; bij groter druppels en groter valhoogte vertoont die krater een toenemende neiging om zich aan de bovenkant te vernauwen en tenslotte tot een bel te sluiten, blijkbaar tengevolge van de lage drukking in de krater en de oppervlaktespanning van de wanden. Maar bij welke druppelgrootte en valsnelheid dit gebeurt is nog niet goed te zeggen.

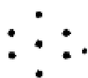
Verscheiden vragen zijn door waarnemingen in 't vrije veld uit te maken, bijvoorbeeld: 1. wat is de invloed van de diepte van het water? 2. Vormen zich blaasjes eerder op vuil dan op schoon water?

Merk op hoe regendruppels op de vlakke plavuizen of hardstenen neerkomen: ze spreiden uiteen tot een cirkel, des te groter naarmate hun snelheid en volume groter was. Bij een onweersregen vindt men vlekken met een middellijn tot 4 cm, bij gewone regen meestal 1 tot 6 mm.

1) C. Kassner, Met. Zs. **52**, 77, 1935.

Spatten[1] schijnen alleen voor te komen als de druppel in water valt of op een zeer nat oppervlak. Kijkt men bij regen langs een wateroppervlak, het hoofd bukkend, dan bemerkt men dat de grote spatten wel 60 cm hoog opspringen, en dat er nog aanzienlijk hoger een mist hangt van heel kleine druppeltjes, die ook door het spatten zijn ontstaan.

In een bepaald geval heeft iemand regendruppels waargenomen[2] die ieder op het vensterkozijn tot een mooi groepje van 6 + 1 uiteenspatten



Regendruppels vormen een eigenaardig spoor in droog zand: een soort kommetje met een rand; het is alsof de druppel de naburige zandkorrels capillair naar elkaar toe trekt, zodat er daaromheen een ringvorming gootje ontstaat.

140. De grootte der regendruppels, bepaald met de meel-methode.[3]

Hoeveel druppels vallen er eigenlijk gedurende een regenbui? En hoe groot zijn ze?

De eenvoudigste manier om de grootte van regendruppels te schatten, is: ze op te vangen



Fig. 62. Uitgeknipt stukje papier om de hoogte van regendruppels te meten.

op een glazen plaatje, hun middellijn en hoogte te meten. Dit laatste gaat het eenvoudigst met een stukje hard papier dat uitgeknipt is, zoals fig. 62 aangeeft.

Veel mooier is de ‘meel-methode’. In een blikken doosje doen we een laag tarwebloem van een centimeter hoog; de bloem moet er los in gebracht worden, niet samengedrukt. Nu stellen we het doosje aan de regen bloot, gedurende ongeveer 5 sekunden, op een plaats waar het niet teveel waait. Elke regendruppel die in de bloem valt vormt daar een bollletje, dat vooral met de loupe duidelijk te onderscheiden is. We laten die bolletjes zolang in de bloem liggen tot ze droog en ietwat hard geworden zijn, en kunnen ze dan op een zwart papiertje uitgieten. Door tegen het papier te tikken, kunnen wij ze doen opspringen en rondhuppelen en ze bevrijden van de aanklevende bloem; het is een toer

1) Met. Mag. **66**, 153, 1931.
2) Nat. **64**, 280, 1909.
3) M.W.R. **32**, 450, 1904.

om er geen te verliezen! Met druppels van bekend volume heeft men proefondervindelijk aangetoond dat de grootte der bolletjes vrijwel nauwkeurig gelijk is aan de grootte der druppels. We kunnen dus nu de afmeting der regendruppels bepalen, en bij-bijvoorbeeld de bolletjes in grootteklassen rangschikken door ze op millimeterpapier te leggen.

Het is aardig om tijdens een bui de druppels telkens na 5 min. te onderzoeken, en de bolletjes dan in hoopjes naast elkaar te leggen op zwart papier, zodat men met één oogopslag overziet hoe de grootte der druppels zich wijzigde.

141. De grootte der regendruppels, bepaald met filtreerpapier.[1)]

Leg een stuk filtreerpapier van 10 × 10 cm^2 op de bodem van een sigarenkistje en bedek het door het deksel te sluiten. Als het regent brengt u het kistje buiten, en opent snel het deksel; het filtreerpapier wordt van 1 tot 120 sec aan de regen blootgesteld, kort als het een echte stortregen is, lang als er maar weinig druppels vallen. Iedere druppel drenkt het papier over een des te groter oppervlak, naarmate hij groter was. Om het aldus verkregen beeld te 'fixeren,' bestuiven we het filtreerpapier met poeder van *eosine*, een anilinekleurstof die bij den drogist te krijgen is. Overal waar een druppel gevallen was, lost de eosine op en kleurt het natte papier; de rest van het eosinepoeder valt er af en dient een volgende maal weer. Het is zaak het bepoeieren zo snel mogelijk uit te voeren, want na één minuut beginnen de kleinste druppeltjes al te verdampen.

> Men kan ook het papier *vóór* de beregening bestuiven met een mengsel van 1d. eosine en 10d. talk, samen fijngewreven, dat voldoende aan het papier hecht; de niet-bestoven kant wordt aan de regen blootgesteld. Of men drenkt het papier met een 2%-oplossing van $FeSO_4$, laat drogen en bepoeiert met rood bloedloogzout[2).] Of men drenkt met $FeSO_4$, droogt, en bepoeiert met een mengsel van looistofpoeder en sandarak. Er is ook papier dat zijn glans verliest waar er een spatje op valt; wrijft men er met potlood over, dan wordt alleen het doffe gedeelte zwart[3)].

Voor 'Barytfiltrierpapier, I Qualität, 311,' van Dreverhoff te Dresden, geldt de volgende betrekking tussen het gewicht

1) M.W.R. **28**, 158, 1900. - Sitzungsber. Wien, 585, 1905. - Met. Zs. **24**, 247, 1907; **49**, 1, 1932.
2). Cosmos, **17**, 699, 1860. - Münch. mediz. Wochenschr. 1922.
3) Hemel en Dampkring, **1**, 213, 1903.

van de druppel (in gram) en de straal *r* (in cm), tot waar hij zich uitbreidt: gewicht = πr^2 (0,0222 + 0,0062 *r* - 0,000233 r^2).

Men ziet dat het gewicht niet evenredig is met het gedrenkte oppervlak: het papier zwelt des te meer naarmate er meer water is. Wie zelf zijn filtreerpapier wil ijken maakt een druppelpipet, van een glazen buisje A en een capillair C, verbonden door een gummibuisje (fig. 63); een klemkraantje B wordt zo weinig opengeschroefd, dat het water druppelsgewijs uitstroomt. Laat een paar druppels op het filtreerpapier vallen en kleur

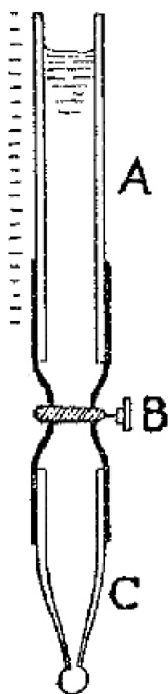


Fig. 63. Druppelpipet, waarmee we druppels van bekende afmeting kunnen maken.

ze; tel hoeveel druppels moeten uitstromen om het water in A over 5 mm te doen zakken, en bereken daaruit het volume van 1 druppel. Met dunner capillairen krijgt men kleiner druppels; voor de kleinste moet het uiteinde geparaffineerd zijn, wat men bereikt door dompelen in gesmolten paraffine en doorblazen. Ook kan men met éénzelfde capillair twee of meer druppels op dezelfde plaats laten vallen, hetgeen op hetzelfde neerkomt als een evenveel maal grotere druppel te gebruiken.

Men kan aldus een tabel of een kurve opmaken, die voor elke soort druppel aangeeft hoe groot het vlekje is.

Bemerk hoe groot meestal de veranderlijkheid der regendruppels is. Er zijn er met een middellijn van 8 mm, maar er zijn er ook kleiner dan 0,5 mm, en zelfs een aantal beneden 0,25 mm, die moeilijk op te sporen zijn. Andere malen nochtans komen er regens van merkwaardig gelijkmatige samenstelling voor.

Rangschik de druppels van een bepaalde regen volgens hun grootte: 0 - 1,5 mm, 1,5 - 2,5 mm, enz. Bereken hoeveel elke grootteklasse tot het neerslag bijdraagt: u vindt dat de grote druppels, al zijn ze veel minder talrijk, toch de doorslag geven. Zij zijn het ook die aan de regen zijn karakter geven.

Stortregen bevat tamelijk weinig kleine druppels, zeer weinig van de middelklasse, maar veel grote druppels. Hij vormt zich in snel opstijgende luchtstromen van bijna 8m/sec. Meestal begint hij met grote druppels (55 mg); gaat dan over tot een

gemiddelde grootte van bijvoorbeeld 2 mg, die lang aanhoudt; en neemt tenslotte weer af tot 0,3 mg.

Stille regen heeft zijn druppels veel gelijkmatiger over de klassen verdeeld. Hij vormt zich in langzaam opstijgende luchtstromen van 0 - 2 m/sec. Meestal begint hij met zeer kleine druppeltjes, die toenemen tot b.v. 0,3 mg en dan lange tijd die afmeting behouden. - Bij onweders, vooral als het in onze onmiddellijke nabijheid bliksemt, zijn de druppels zeer groot.

Uit enkelvoudige wolkenlagen van geringe dikte (Cu, Nbst, Cist, Cicu) vallen weinig grote druppels. Uit wolken in verschillende lagen die samen een grote dikte beslaan, vallen veel grote druppels; zulk een toestand vindt men b.v. in onweersbuien die zich vormen, en waar de CuNb-wolk zich tot een Cist-scherm uitbreidt.

Onderzoek om de 10 min. de samenstelling van de regen gedurende het voorbijgaan van een bui, om het uur gedurende het voorbijgaan van een depressie. De buitenkant van een bui heeft kleinere druppels dan het centrum.

Bepaal alleen het *aantal* druppels dat per sekunde valt, - wat zonder ijking van het papier mogelijk is -; meet tegelijk de hoeveelheid regen van de bui, en bereken uit beide getallen de *gemiddelde* grootte der druppels. Een waarnemer vond: 12 tot 15 mg voor een onweersbui, 0,5 mg voor zeer zwakke regen.

142. Vormveranderingen van vallende regendruppels.[1)]

Slechts in schijn bestaat de regen uit straaltjes. In werkelijkheid zijn het altijd afzonderlijke druppels, die echter zo snel vallen, dat het oog ze als een lijn ziet. U kunt er zich rechtstreeks van overtuigen, door vlak naast een huis te gaan staan en bijna vertikaal omhoog te kijken: doordat u bijna in de valrichting der druppels kijkt, ziet u ze als afzonderlijke heldere of donkere bolletjes op u aankomen.

Als de zon schijnt terwijl het regent, ziet u de vallende regendruppels als schitterende lichtstreepjes, het mooist wanneer u op niet te grote hoekafstand van de zon naar een donkere achtergrond kijkt. Het merkwaardige is nu, dat die lichtlijnen eigenlijk uit reeksen heldere stippeltjes bestaan. Hieruit moeten we besluiten dat de druppels bij het vallen voortdurend van vorm veranderen; dat zou b.v. kunnen als ze ‘capillaire trillingen’ uitvoeren, zoals we dat weten van de druppels van een waterstraal,

1) W. Schmidt, Met. Zs. **30**, 457, 1913.

en daarbij beurtelings uitgerekt of afgeplat worden (fig. 64). De periode van zulke trillingen is gegeven door

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{sr^3}{8\alpha}}$$

(s = s. gew. vloeistof; α = capillariteitsconstante, voor water 73). Bij dergelijke proeven let men allicht het meest

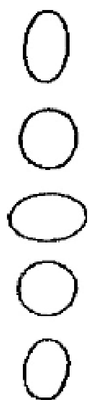


Fig. 64. Vormverandering van een vallende regendruppel door capillaire trillingen.

op de grote druppels van b.v. 4 mm middellijn, voor dewelke de formule een trillingstijd van 0,025 sec geeft; zulke druppels vallen met een eindsnelheid van ruim 700 cm/sec en leggen dus ongeveer 20 cm af tussen de lichtmaxima die men waarneemt. Telkens als de druppels weer in dezelfde phase zijn, weerkaatsen ze 't licht op ongeveer gelijke wijze.

143. Regen of sneeuw bij volkomen heldere lucht.

Oudere schrijvers beweren, dat regen bij heldere lucht inderdaad voorkomt, ook in ons klimaat.[1)] Zorgvuldige beschrijvingen van het verschijnsel zijn zeer gewenst,[2)] voor zover zij echter op de nachturen betrekking hebben zal het zeer moeilijk blijven de afwezigheid van wolken op betrouwbare wijze vast te stellen.

Deze merkwaardige neerslagvormen schijnen verklaard te moeten worden door de geringheid van het aantal condensatiekernen, zodat de waterdamp zich in een klein aantal druppels verdicht, die dan natuurlijk snel een grote afmeting bereiken.

In de vroege lente ziet men soms, bij vochtig-warme lucht, hoe de NW-wind plotseling invalt en de lucht van onder tot boven ineens in een ware sneeuwbui verandert: het is eigenlijk een sneeuwwolk, die zeer laag hangt en op de aarde rust. Of bij zeer strenge koude en rustige lucht vallen kleine sneeuwkristalletjes uit blauwe lucht, niet in vlokken maar als afzonderlijke naaldjes, plaatjes of bolletjes, die in de zon schitteren (‘diamantstof’, § 153).

In andere gevallen is het verschijnsel slechts te wijten aan de langzaamheid der beweging van de vallende sneeuw, die ongeveer een half uur nodig heeft om van een hoogte van 4500 m neer te komen (snelheid ca. 3 m/sec)! In die tijd kunnen de wolken, waaruit de sneeuw afkomstig is, al bijna aan de gezichteinder verdwenen zijn, zodat de waarnemer een blauwe lucht ziet.

1) C.R. band **5, 11, 12, 14** (1837-1842).
2) Hemel en Dampkring, **29**, 30 en 348, 1931; **32**, 339, 1934; **33**, 166, 1935.

144. Invloed van geschutvuur op de regenval.

Er is heel veel over de mogelijkheid van zulk een effekt gefantaseerd. De ervaring van de wereldoorlog heeft echter geleerd, dat zelfs de aanhoudende ontlading van duizenden kanonnen aan het westelijk front geen merkbare invloed op de neerslagen, noch op het weer heeft gehad.[1] Vgl. § 4.

145. Opdrogende regen (fig. 65).

Het heeft geregend, 't is weer

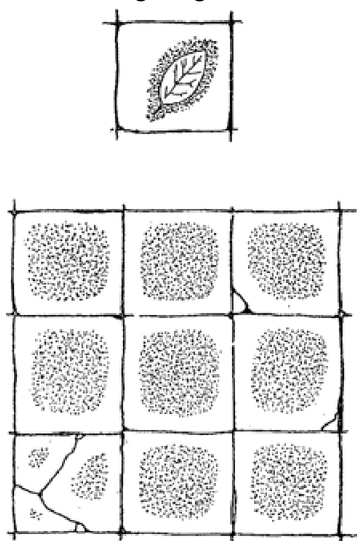


Fig. 65. Opdrogende regen op trottoirtegels.

droog; maar op de plavuizen vóór ons huis liggen nog enige bladeren, elk omringd door een donkere zoom. Licht ze op: er is een laagje water onder het blad; het is daar beter beschermd tegen verdamping, kruipt vandaar voortdurend capillair door de poriën van de steen vooruit, maar verdampt ondertussen meer en meer, tot het verdwenen is. Daar is dan de grens van de donkere zoom.

Waar plavuizen nat geweest zijn en opdrogen, ziet men eerst de randen helderder van kleur worden, terwijl het midden nog donker is, dus vochtig. Het water schijnt dus aan de voeg tussen twee stenen sneller te verdwijnen, hetzij dat het in het cement of in de aarde daaronder wordt opgezogen, hetzij dat het sneller verdampt.

146. Regen op zee

is niet merkbaar zout. Steek maar uw tong uit en proef! Blijkbaar is de hoeveelheid fijne druppeltjes die van de golven opspatten wel heel gering, daarenboven worden ze telkens door de regendruppels weggeveegd (vgl. § 97).

1) Hemel en Dampkring. **12**, 120, 1915.

147. Stofregen.[1)]

Soms bedekken zich ruiten en houtwerk en alle voorwerpen buiten met een fijn stof; het best ziet men het op de daken, op de witheid van de sneeuw. Andere malen merkt men, dat er zich een geelachtig bruine nevel vormt, die soms het daglicht merkbaar verzwakt of een geur van as heeft. Het is van groot belang, bij zulk een stofval zorvuldig dag en uur op te tekenen, waarop het verschijnsel begonnen is, daar deze gegevens, vergeleken met die uit naburige landen, kunnen leiden tot een bepaling van de weg die de stofwolken gevolgd hebben. Ook tekene men op: de kleur, de mikroskopische samenstelling, de eventuele oplosbaarheid in koud zoutzuur, soms gepaard gaande met de ontwikkeling van belletjes kooldioxyde; in het opgeloste gedeelte zoeke men chemisch: Fe, Al, Ca, Mg.

Men verzamelt zo goed mogelijk het merkwaardige stof, door het met een natte zakdoek voorzichtig aan te tippen. Eigenlijk moest ieder natuuronderzoeker een bord op zijn dak zetten, om geregeld te kunnen nagaan of zich daar iets op afgezet heeft. Bruikbaar zijn ook glazen platen, met glycerine ingesmeerd: het stof blijft er in plakken, en later lost men alles in water op en filtreert. Of men neemt een grote blikken trechter (70 × 70 cm) en laat eventueel stof door de regen meespoelen in een daaronder staande fles. Is het de sneeuw die gekleurd is, dan schept men de bovenlaag af, laat smelten en filtreert.

De oorsprong van het stof kan zeer verschillend zijn. Het is voldoende dat er in de nabijheid gebouwd

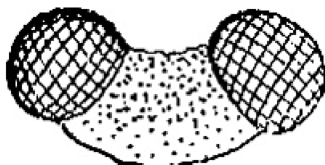


Fig. 66. Stuifmeelkorrel van een denneboom‘ door het mikroskoop gezien (200 maal vergroot). Aan beide uiteinden, een ledige holte die het zweven vergemakkelijkt.

wordt, opdat men stofneerslagen zie verschijnen. Roet is meestal door een brand in de nabijheid ontstaan, het kan aanleiding geven tot ‘inktregen’[2)]. In andere gevallen daarentegen bevatte zulke regen zeer fijne korreltjes aarde van slechts 1 μ groot, zo fijn dat ze niet bezonken.[3)] ‘Gele sneeuw’ is gewoonlijk sneeuw die bedekt is met het stuifmeel van dennebomen; in streken met veel dennebomen kan men in de maand Mei opmerken (te Bilthoven b.v.) hoe alle

1) Wetter, **20**, 265, 1903.
2) Hemel en Dampkring, **1**, 30, 1903. - Nat. **70**, 424, 1904. - Q.J. October 1912.
3) M.W.R. **31**, 536, 1903.

plassen die de regen vormt met een grijsgele rand omzoomd zijn; hele vijvers kunnen geel bepoederd zijn, vooral aan de zijde, naar waar de wind blaast (fig. 66). Rode sneeuw ontstaat door mikroskopische wieren (Haematococcus), die bloedrood gekleurde lichaampjes bevatten. Soms viel er geelachtig of roodachtig mergelstof; soms bruine oker, afkomstig van een naburig fabrieksstadje, terwijl de regen een groot NaCl-gehalte bevatte.[1)] Bij een zware storm heeft men grote hoeveelheden kalksteentjes zien neervallen van *een paar centimeter* groot, die afkomstig bleken van een 150 km verwijderd terrein![2)]

Regens van dorre bladderen, graankorrels, hooi of bloemen komen herhaaldelijk voor, wanneer een wervelwind deze voorwerpen eerst heeft opgezogen en ze dan een eind verder laat terugvallen. In een bepaald geval werden grote hoeveelheden hooi over een afstand van 3 mijl verspreid: bij het neerkomen tooide het de huizen met de meest onverwachte festoenen!

Een zeer bijzondere betekenis hebben de gevallen, waarvan men heeft kunnen aantonen dat *zand uit de Sahara* over grote delen van Europa verspreid is.[3)] Men heeft de weg kunnen bepalen die de luchtstroom gevolgd had, uit de vergelijking der uren, waarop de stofregen werd waargenomen; die weg bleek overeen te komen met de op dit ogenblik heersende luchtstromingen. Men kon nagaan hoe eerst de grovere deeltjes waren neergevallen, later de fijnere bestanddelen. Daarenboven was de samenstelling van het stof dezelfde als van kenmerkende lagen in de Sahara: roodbruin ijzerhoudend lateriet, of in een bepaald geval kleine witte korreltjes (fossiele copepoden van het geslacht Cypridinia).[4)]

148. ‘Regen’ van kleine diertjes.[5)]

Scholen visjes worden soms door een hoos opgezogen, hetzij uit de zee, hetzij uit vijvers; honderden meters verder vallen ze neer, meestal dood, en dan is het soms erg moeilijk de juiste oorsprong terug te vinden.[6)] Dergelijke avonturen overkomen

1) C.R. **186**, 1928.
2) C.R. **113**, 100, 1891.
3) In Nederland b.v. de stofval van 1903; zie Hemel en Dampkring, **1**, 118, 1903.
4) C.R. **127**, 1231, 1898.
5) Veel oude waarnemingen in: Flammarion, l'Atmosphère, blz. 690-691.
6) Het geval wordt o.a. vermeld voor Ammodytes Tobianus. Vgl. Nat. **102**, 46, 1918.

ook wel eens zoetwaterschelpen,[1)] kikkervisjes, kikkers,[2)] padden, bladluizen (in ontzaglijke hoeveelheden).

'Rupsenregens' zijn ietwat anders te verklaren. In een bepaald geval waren het larven van kevers (Cantharis), dus helemaal geen rupsen; ze leefden onder de grond, maar de storm blies de bovenste zandlaag weg en ze kwamen vrij; toen het sneeuwde boorden ze door de sneeuwlaag en werden zichtbaar.[3)] Andere malen ziet men na lange regens hoe de aardwormen in grote hoeveelheden verschijnen; natuurlijk niet omdat het wormen geregend heeft, maar omdat die dieren in de doornatte aarde niet kunnen ademhalen en dus bovenkomen.[4)]

In verschillende gevallen is het moeilijk uit te maken of de dieren door de wind meegevoerd zijn, ofwel of ze door een ander biologisch proces in zulke grote hoeveelheden ineens verschijnen.[5)] Een 'regen' van mieren, over verschillende vierkante mijlen, was ook niet met een onweer in verband te brengen en zal wel een biologisch verschijnsel geweest zijn.[6)]

149. Waterbomen.

Bij Ruurlo, komende van het Ravenbos, gaan wij over het bruggetje over de beek naar het 'kleine Mene.' In het laantje tegenover de ingang van de weide staat een 'waterboom:' enige takken van de stam vormen een holte, waarin er altijd water staat, zelfs in de droogste zomers. De vogels kennen de drinkplaats. Het schijnt wel dat dit water niet afkomstig is van de regen, maar althans ten dele door de boom zelf geleverd wordt: het zou opstijgen tussen bast en kernhout.[7)]

Ook in de nabijheid van de echoput bij Apeldoorn staan waterbomen.

1) Himmel und Erde, **26**, 193, 1914.
2) Ann. soc. mét. France, **42**, 49, 1894.
3) Wetter, **20**, 265, 1903.
4) M.W.R. **27**, 1899.
5) Larven van Telephorus fuscus, een kever; van Trogosita Mauretanica; rupsen van Stibia stagnicola.
6) La Nature, **29**, 230, 1901.
7) A.N.W.B. Te voet van Arnhem naar Ruurlo, blz. 58.

150. Vorming van de sneeuw.

O Kinders van de lucht,
gesneeuwde blommigheden;
o sterrenpulver, fijn
gevijlsel van krystaal!

G. Gezelle, Tijdkrans.

Stel dat de lucht, die in een depressie aan het opstijgen is, al zo hoog is gekomen dat ze tot onder het vriespunt afgekoeld is; dan zal bij verdere stijging en condensatie de waterdamp rechtstreeks in sneeuw overgaan, zonder eerst water te worden. Men kan het die ranke, tengere sneeuwkristalletjes aanzien, dat ze uit de ijlheid van een damp, van een gas zijn ontstaan! Bij het vallen kan de sneeuw wel in warmere luchtlagen komen, als hij er maar snel genoeg doorheen schiet om niet te smelten. Stellig waargenomen is sneeuw bij 11°, waarschijnlijk eenmaal bij 16°! Verreweg het meest komt echter bij sneeuwval een temperatuur in de buurt van het vriespunt voor.

Soms kan men van verre de vorming bespieden van sneeuwbuien die de grond niet bereiken.[1)] Men ziet ze reeds met een klein kijkertje, dat b.v. 50 maal vergroot, als ontzaglijke zwermen voorbijtrekkende ‘stofjes;’ ze zijn het helderst op een graad of vijf van de zon. Hun hoogte is af te leiden uit de instelling van het oculair waarbij ze het scherpst lijken: men vindt hoogten tussen 200 en 4000 m, meestal echter in de buurt van 500 m. Kent men de hoogte, dan is uit de schijnbare snelheid ook de ware snelheid te berekenen, waarmee ze voortjagen: die is van de orde van 2 m/sec, in de hogere lagen 8 m/sec.

Als de vensters en deuren van een balzaal ineens wijd open worden gezet, en het is koud buiten, kan men opmerken hoe de eerst doorzichtige lucht in de zaal nu ineens mistig wordt. In Rusland heeft men het onder dergelijke omstandigheden wel eens in de zaal zien *sneeuwen*;[2)] ditzelfde werd in Lapland waargenomen door Maupertuis, toen hij in 1736 te Torneå verbleef voor de beroemde graadmeting; het wordt ook verteld van de onderaardse stallen te Erzeroem (Perzië).

Het merkwaardigste geval van dien aard deed zich echter voor in een stad van N-Amerika, waar het op een zeer koude winterdag uren lang in een straat sneeuwde, bij wolkenloze lucht;[3)] de

1) H. Waldner, Nat. **5**, 304, 1872. Een aantal waarnemingen in het Bull, de l'Obs de Talence.
2) Zie ook Centralblatt. f. Miner. A. (1933), 177.
3) M.W.R. **32**, 170, 1904.

vlokken vormden zich ongeveer 14 meter boven de grond, en dwarrelden dan neer, terwijl er hoger geen sneeuw te zien was. Waarschijnlijk steeg voortdurend warme, vochtige lucht van de huizen aan beide kanten van de straat op, en daalde afgekoeld en gecondenseerd in het midden weer naar beneden.

151. De hoeveelheid sneeuw.

De hoeveelheid sneeuw die gedurende een bui of in 24 u gevallen is, kunnen we met onze gewone regenmeter bepalen (§ 135). Voor kleine hoeveelheden sneeuw brengen we eenvoudig fles en trechter na de sneeuwval in een verwarmde kamer, wachten tot de sneeuw die zich in de trechter verzameld had gesmolten is, en berekenen dan het neerslag in mm zoals we 't voor de regen gedaan hebben. Blijft het echter overvloedig sneeuwen, dan gieten we af en toe 100 cm^3 warm water in de trechter, zodat de sneeuw die er in gevallen was telkens smelt en dat het smeltwater in de fles loopt; trek naderhand het volume van het bijgevoegde warme water weer af.

De dichtheid van een sneeuwpartikeltje is eigenlijk die van ijs, dus 0,91. Maar het is ook belangwekkend de dichtheid te onderzoeken van de gevallen sneeuw *als geheel*, met al zijn luchtholten. Om die dichtheid te bepalen, steken we op enkele plaatsen een potlood of een houtje in de sneeuwlaag en schatten de gemiddelde dikte *d*. In onze gewesten is het zelden dat die de 10 cm overschrijdt. Vervolgens verzamelen we al de sneeuw die op een vierkant van 50 cm × 50 cm ligt, laten hem in de kamer smelten en bepalen het volume *v* van het smeltwater. De dichtheid is dan

$$\frac{v}{50 \times 50 \times d}$$

.

Als de sneeuwlaag dik genoeg is, kunnen we met een blikken busje een zuivere sneeuwcylinder van bekend basisoppervlak en dikte uitsteken, het smeltwater wegen, en het gewicht per volume-eenheid berekenen.

Voor verse sneeuw vinden we gemiddeld 0,08 tot 0,10; bij oude sneeuw is de dichtheid groter, wat vrijwel uitsluitend te wijten is aan het samendrukken der onderste lagen door de bovenste: als er veel sneeuw gevallen is, vindt men door dagelijkse meting van de laagdikte, dat deze omgekeerd evenredig aan de dichtheid is. Door wind wordt de dichtheid van de sneeuw in 't algemeen groter. ‘Natte sneeuw,’ die bij een temperatuur om of boven het vriespunt valt, is veel dichter dan droge sneeuw,

die bij rustige lucht en lage temperatuur valt. De uiterste waargenomen dichtheden zijn 0,013 tot 0,40.[1)]

Welk gedeelte van de lucht is tijdens een zware sneeuwval met sneeuw gevuld? - We bepalen de valsnelheid, door te tellen hoeveel sekunden een bepaald vlokje er over doet om van de hoogte van een dakrand tot op de grond te dalen; stel, we vinden 0,97 m/sec. of 3500 m/uur. Tevens schatten we dat de sneeuwlaag 0,03 m/uur aangroeit. De 'verdunning' van de sneeuwvlokken bedraagt dus 0,03/3500 = 1/120000 ongeveer![2)] Laat nu in gedachte de vlokken, die een dichtheid 0,1 hebben, samensmelten tot regendruppels met dichtheid 1; dan wordt de verdunning 0,1:120000 = 0,0000008, en zo komen we weer terug op een getal van dezelfde orde als hetgeen wij voor de regen hadden geschat (§ 133).

152. De sneeuwkristallen.[3)] (Platen VIII en IX).

Maar waarom zijn ze zeskant? J. Kepler, 1611.

Als het sneeuwt laat een natuurliefhebber zeker de gelegenheid niet voorbijgaan om enige vlokken op de mouw van zijn winterjas op te vangen en ze aandachtig te bekijken, het liefst door een vergrootglas. Dikwijls zult u niets zien dan een verzameling onregelmatige klompjes of halfgesmolten druppeltjes, vooral als de sneeuw bij lage barometerdruk gevallen is. Veel regelmatiger is daarentegen de sneeuw die valt bij rustige lucht en hoge druk; soms zijn het pakketjes fijne naaldjes, maar dikwijls ook de beroemde wondermooie, zesstralige sterretjes, verrukkelijk rank in hun glinsterende symmetrie. Die sneeuwkristalletjes hebben meestal een grootte van een paar millimeter, ze zijn dus duidelijk met het blote oog waar te nemen, en ieder die zich de

1) M.W.R. **29**, 219, 1901.
2) Vaughan Cornish, Waves of sand and snow.
3) Hellman: Schneekristalle (Berlin, Mückenberger, 1893). - A. Dobrowolski, La neige et le Givre (Résultats du voyage du S.Y. Belgica, 1903). - Het standaardwerk met prachtige platen is: Bentley, M.W.R. **29**, 212, 1901; **30**, 607, 1902; **52**, 530, 1924; als geheel uitgegeven door Humphreys in 1931. Men vindt daar ook aanwijzingen voor het maken van mikrofoto's. - De moderne reeks onderzoekingen is die van Nakaya en zijn medewerkers in Journ. Faculty of Science Hokkaido, Series II (Physics), 1934-1936; we nemen hun indeling van de sneeuwkristallen over.

moeite wil geven enkele malen de sneeuw te bekijken, kan zeker zijn dat hij ze te zien krijgt. De grootste ooit waargenomen exemplaren bereikten een middellijn van 1 centimeter!

De sneeuwkristalletjes behoren alle tot het hexagonale stelsel. Men heeft ze aldus ingedeeld[1)]:

I. Naaldvormige kristallen.
   1. Enkelvoudige naalden (9).
   2. Combinaties van naalden (9').

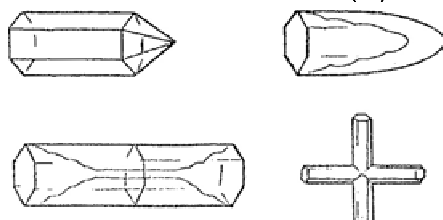


Fig. 67. Enkele sneeuwkristallen van het zeldzame type II.

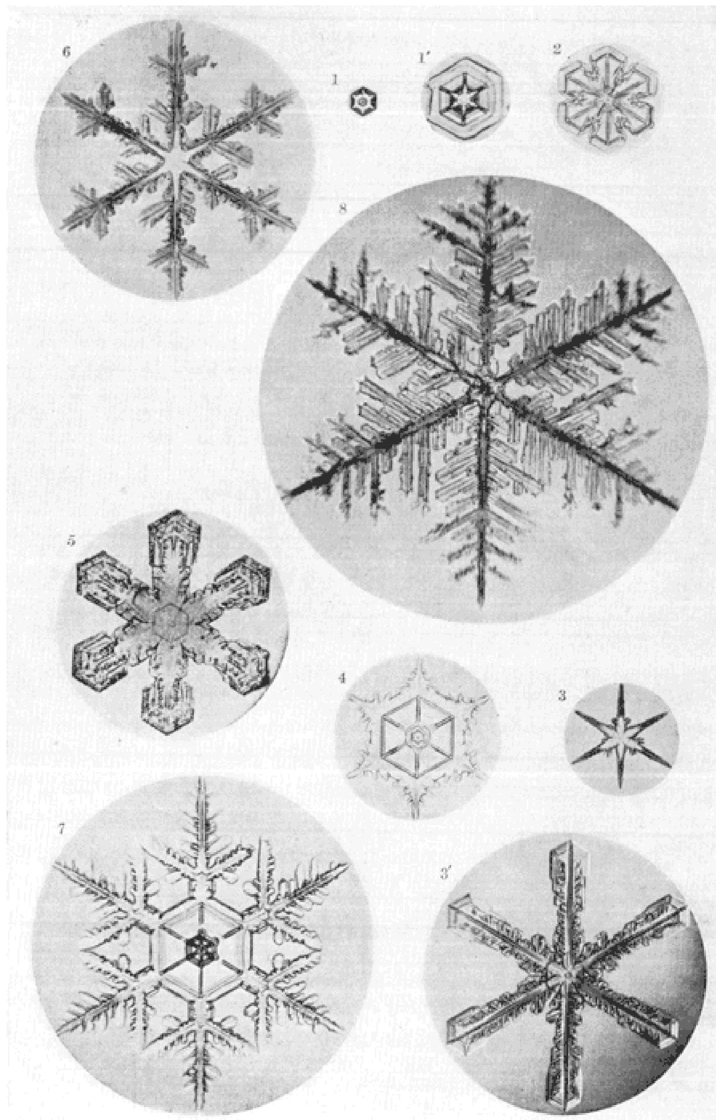
II. Zuilvormige kristallen [zeldzaam; fig. 67].
   1. Enkelvoudige zuil (10).
      a. pyramide (hemimorf)
      b. kanonkogelvorm (hemimorf)
      c. zuil, bestaande uit tweelingkristal, met luchtholte in zandlopervorm; de twee kristallen zijn door een dun lijntje gescheiden.

   2. Combinaties van zuilen of kanonkogelvormen (11, 16).

III. Vlakke kristallen.
   1. Regelmatige kristallen die in één vlak ontwikkeld zijn.
      a. stervormig (3, 3')
      b. varenvormig vertakt (6, 8)
      c. vlakvormig uitgebreide ster (2, 5)
      d. plaatje (1, 1')
      e. plaatje met aanhangsels aan de hoeken (4, 7)
      f. ster met plaatjes aan de uiteinden der punten

   2. Kristal met twee kernen.
   3. Slecht gevormd kristal.

1) De nummers tussen haakjes verwijzen naar de foto's op plaat VIII en IX.



PLAAT VIII. Plaatvormige Sneeuwkristallen.
Vergroting 16; voor elke soort is een kristal gekozen van de gemiddeld voorkomende grootte.
Naar Nakaya en Setido, Journal Hokkaido, Ser. II, 1, 243, 1936.

4. Ster met vertakkingen die niet in het vlak der ster gericht zijn (Bentley beschrijft deze vorm als een ster, bedekt met *rijp*; vermoedelijk ten onrechte) (17).
5. Naar alle ruimterichtingen uitstralend (14, 18).

IV. Combinaties van zuiltjes en vlakke kristallen [zeldzaam].
1. Tafelvormig (12, 13).
2. Twaalfzijdig kristal.
3. Kanonkogelvorm op vlakke kristallen (15).

V. Kristal bedekt met druppeltjes (vergrootglas gebruiken, mikroskoop!); allerlei overgangen komen voor tussen een sneeuwkristal en een korrel losse hagel.

VI. Vormeloos.

Natuurlijk zijn er allerlei overgangsvormen. De plaatjes gaan door een aantal combinaties geleidelijk over in sterretjes met centrale zeshoek, en tenslotte in zuivere sterretjes. In het algemeen neemt de grootte van de kristalletjes daarbij voortdurend toe, gemiddeld van 0,5 mm tot 3,5 mm. Van elke vorm zijn er weer variëteiten, naarmate de aanhangsels talrijker zijn en dichter opeen staan.

Als men zijn mikroskoop met de objektglaasjes een nacht lang buiten heeft laten staan, zodat hij de temperatuur van de lucht heeft aangenomen, kan men de buitengewoon belangwekkende inwendige bouw der sneeuwkristallen onderzoeken. Men ziet sierlijke lijnen, die de zestallige symmetrie vertonen (ster, zeshoek, cirkel); vooral de centrale delen der sterretjes zijn dikwijls prachtig. Er zijn openingen en spleten, kanalen, holten en blaasjes, die zich dikwijls wonderbaarlijk zuiver symmetrisch herhalen. Ze zijn ontstaan toen het stervormige kristal uitgroeide en zich ontwikkelde, zodat de stralen elkaar ontmoetten, daarbij hier en daar vrije tussenruimten openlatend. De armen van de sterretjes worden dikwijls doorlopen door twee fijne lijntjes; Nordenskiöld[1)] denkt dat het kanaaltjes zijn, en beweert dat ze open komen als men het kristal even laat liggen, zodat het verdampt: hij brengt er een druppel van een rood gekleurde vloeistof op en bemerkt hoe die in de kanaaltjes kruipt. Bentley betwijfelt dit, denkt dat de kanaaltjes veeleer verhoogde ribbels zijn, die als lijsten op het kristal zitten; want hij vindt er belletjes

1) Nat. **48**, 214, 1893.

in, en beweert dat bij verdamping de ribbels het langst blijven bestaan. Bedenk dat deze struktuur zich vertoont in een sterretje van slechts 0,01 mm dikte! Vgl. plaat VIII, fig. 1', 2, 4, 7 enz.

Bijna altijd is er op de vlakken een arcering van trapsgewijs oplopende lijntjes, min of meer evenwijdig aan de randen. Dit schijnen groeilijnen te zijn, welke de vormen aangeven die het kristal achtereenvolgens heeft aangenomen. Sommige sneeuwkristallen vertonen onder 't mikroskoop groepen kleine stippels, wondermooi symmetrisch; uit verschillende overwegingen volgt, dat dit geen putjes zijn, maar kleine luchtbelletjes.

Zeer merkwaardig is, dat men soms bij temperaturen diep onder 0° kleine holten in de kristallen aantreft, klaarblijkelijk gevuld met vloeibaar water: want men ziet er zeshoekige plaatjes in zweven. Nordenskiöld ontdekte dat ook sommige pyramidevormen met water gevuld zijn, waarin een luchtbelletje heen en weer bewoog. Waarom dat water niet bevriest is onbegrijpelijk. Verder inzicht in de bouw der sneeuwkristallen verkrijgt men, door onder het mikroskoop te volgen hoe ze verdampen, daarbij van vorm veranderen en achtereenvolgens verschillende stadia doorlopen.

De beginneling, die sneeuwkristallen onder 't vergrootglas natekent, maakt zijn schetsen altijd te symmetrisch, te fraai. De foto's hebben ons geleerd dat er heel wat meer afwijkingen van de regelmaat zijn dan men zou verwachten.[1)] Soms zijn de zijden van de zeshoek afwisselend lang en kort, en sommige figuren vertonen een ontwikkeling



Fig. 68. IJsplaatje van het rhombische type (zeer zeldzaam).

die meer aan 3-tallige dan aan 6-tallige symmetrie doet denken: dit zou een aanwijzing zijn voor het bestaan van *hemiëdrische* vormen. Nordenskiöld beweert dat ijs ook in een *rhombische* vorm kan voorkomen; in elk geval is het zeker dat er plaatjes bestaan zoals in fig. 68 getekend, waarin men de overgang van het 6-hoekige stelsel naar het rhombische kan zien. In andere gevallen zijn de stralen van de ster ongelijk lang op onregelmatige wijze; er zijn extreme gevalen waarin maar één enkele straal ontwikkeld is! De aanhangsels aan beide zijden van een straal zijn bijna nooit echt symmetrisch ontwikkeld (Plaat VIII, fig. 8). De omtrekken van de zeshoek kunnen zwak gebogen zijn inplaats van recht.

1) Nakaya, Setido en Tada, Journ. Fac. of Sc. Hokkaido, II, **1**, 215, 1936.

De fijne druppeltjes, die soms het sneeuwkristal bedekken, zijn ongeveer 0,03 mm groot, en moeten vermoedelijk beschouwd worden als de druppeltjes zelf waaruit de wolken zijn opgebouwd (vgl. § 113). Waarnemers die dicht bij de zeekust werkten, hebben opgemerkt dat deze druppeltjes vooral verschijnen als de wind van de zeekant waait. Hoe meer van die druppeltjes op het kristal neerslaan, hoe dikker het wordt en hoe meer het overgaat in een korrel losse hagel.

Er moeten natuurlijk bepaalde redenen zijn, waardoor een sneeuwkristal juist *deze*, en niet een andere vorm aanneemt. We weten thans, dat het hexagonale kristalstelsel samenhangt met de bouw van het watermolekuul. Maar daarnaast is het van belang, zich af te vragen, wanneer het basisvlak zich bij voorkeur zal ontwikkelen en wanneer de prisma- of de pyramidevlakken; wààr het dus van afhangt, of een sneeuwkristal de ene of de andere der hierboven beschreven vormen zal vertonen.

Het is zeer moeilijk, uit natuurwaarnemingen enig antwoord op deze vraag te geven. We kunnen de temperatuur, en de overige omstandigheden wel onderzoeken nabij de begane grond, maar we weten niet hoe ze in hogere lagen zijn. Zeker schijnt wel, dat naaldjes vooral bij hoge temperatuur vallen. Verder beweert men, dat uit hoge wolken vooral zuiltjes en plaatjes neerkomen; uit lage, sterretjes. Aan de Westzijde van een depressie zouden de kristalvormen beter ontwikkeld zijn dan aan de Oostzijde. ook zijn ze mooier bij lichte dan bij zware sneeuwval. Bij elke bepaalde sneeuwval verschijnen slechts enkele vormen, dikwijls in een zeer bepaalde opeenvolging. Zelfs de abnormale kristallen met 2 kernen of met 12 zijden vallen dikwijls met verscheidenen kort na elkaar bij éénzelfde bui, hun vorming is dus stellig ook geen ‘toeval.’;

De beste manier om deze wetmatigheden op het spoor te komen, is de proef in 't laboratorium en de theoretische overweging. Of de lucht waarin de kristalletjes groeien sterk of slechts weinig oververzadigd is, schijnt een der belangrijkste faktoren te zijn die hun vorm bepaalt. Een groeiend kristal haalt de waterdamp uit de lucht weg in zijn nabije omgeving, zoals we later nog rechtstreeks voor onze ogen zullen zien (§174); de hoeken en spitsen zijn het verst vooruitgeschoven en krijgen dus nog voldoende toevoer van waterdamp, terwijl de binnenste delen in groei achterblijven. Vandaar dat zich bij sterke oververzadiging, dus bij steil verval in het waterdampgehalte, een waar ‘kristalskelet’ ontwikkelt: een sterretje. Wanneer de oververver-

zadiging echter gering is, is het verval in waterdampgehalte klein, en het kristal groeit regelmatiger en meer als geheel. Men heeft gevonden, dat bij een zeer sterke oververzadiging sterretjes, bij gemiddelde oververzadiging plaatjes, bij geringe oververzadiging zuil- en prismavormen verschijnen; en er is alle reden om aan te nemen, dat sneeuwkristallen in de natuur zich evenzo gedragen. Bij een groeisnelheid van 4,6 mm per uur ontstonden sterretjes; bij een snelheid van 0,7 mm per uur, plaatjes. Ieder sneeuwsterretje vertoont de sporen van alles wat het in zijn leven meegemaakt heeft: in de hoogste lagen zijn de binnenste delen gevormd, en naarmate het lager daalde is het aangegroeid en zijn de buitenste delen ontstaan. We kunnen nu om zo te zeggen, aflezen hoe sterk de oververzadiging in die opeenvolgende lagen geweest is; een kristal b.v. zoals dat op plaat VIII nr. 7 is bij geringe oververzadiging ontstaan, en heeft zich bij toenemende oververzadiging ontwikkeld; enz.

153. IJsnevel = diamantstof.[1)]

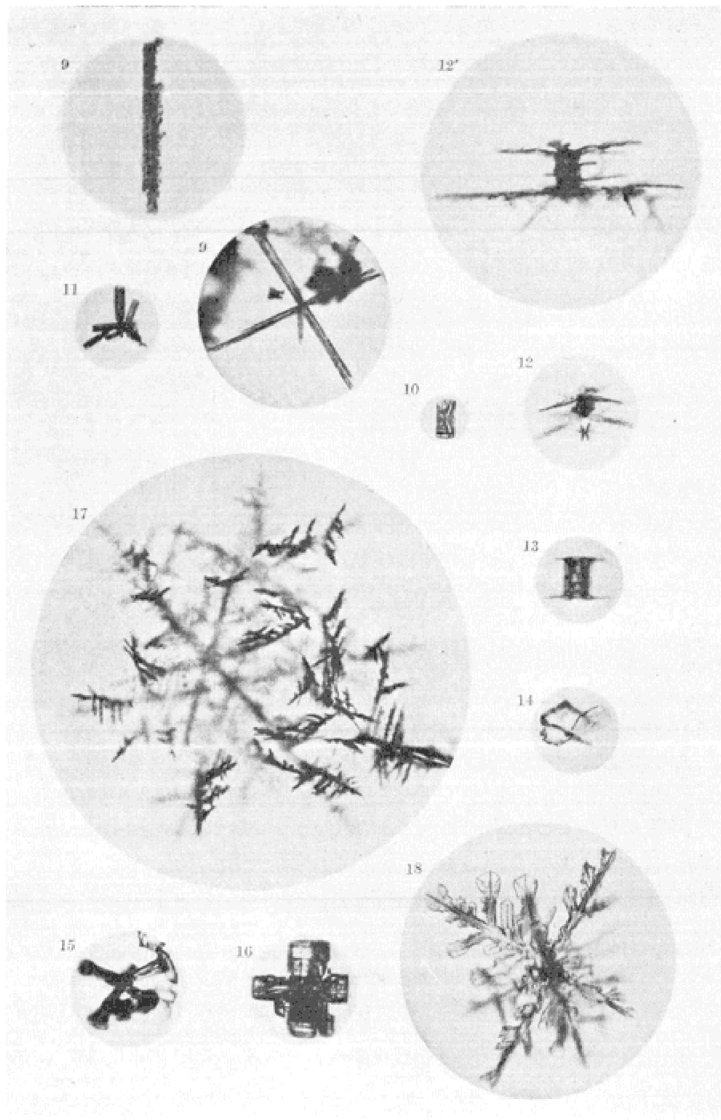
Dit is een vorm van hele kleine sneeuwkristalletjes, die één voor één vallen, en die men niet zou zien als ze niet schitterden in de zon, als fonkelende schilfertjes, die langzaam neerdalen. Dikwijls geven ze aanleiding tot de heerlijkste halo-verschijnselen. Deze vorm van neerslag komt veelvuldig voor in de poolstreken, maar zelden in onze gewesten; de temperatuur moet lager zijn dan 7° of 8° beneden het nulpunt. De kristalletjes zijn altijd plaatjes en nooit sterretjes, meestal slechts enkele 0,1 mm groot, zuiver symmetrisch en sierlijk gebouwd; dit klopt met een algemene regel, die zegt dat de afmetingen gemiddeld toenemen, bij overgang van plaatjes naar sterretjes.

> *Ik zag sneeuwkristallen in zonnig-klare lucht*; *het sneeuwde niet, het waren de kristallen zelf, de allerfijnste sneeuwkristallen die neerzweefden! Ik heb nooit iets gezien dat zo fonkelend rein was. Ze glinsterden in de lucht, in het zonlicht, met miljoenen, en vielen zonder geluid.*
> *Bj. Björnson, Laboremus, II*, 2.

154. Sneeuwsterren.[2)]

Bij rustige lucht en helder weer kan men soms opmerken dat een sneeuwlaag zich na een paar dagen bedekt met een pantser

1) Wetter, **18**, 72, 1901. - Hemel en Dampkring, **30**, 62, 1932 (bij een temperatuur van - 7°).
2) J. Wolfers, Rep. Brit. Ass. 1858. - Sansac, La Nature, 24 Déc. 1879. - A. Lanner, Innsbruck 1904.



PLAAT IX Sneeuwkristallen van verschillende soorten.
Vergroting 16; voor elke soort is een kristal gekozen van de gemiddeld voorkomende grootte.

Naar Nakaya en Setido, Journal Hokkaido, Ser. II, **1**, 243, 1936.

van mooie, grote, zesstralige sterren, die elkaar niet overdekken. Ze liggen vrijwel in hetzelfde vlak, en weerspiegelen alle tegelijk het zonlicht naar ons oog. Blijkbaar zijn ze niet uit de lucht gevallen maar *ter plaatse* gevormd, wellicht door sublimatie van de daaronder liggende sneeuw, of door nevel die tegen reeds gevormde sneeuwkristallen is neergeslagen en ze heeft doen groeien.

Zoek op planten en gras aan de oevers van kleine rivieren!

155. De sneeuwvlokken.

Dikwijls zijn de sneeuwkristalletjes zo klein en onregelmatig, dat men de kristalvormen niet onderscheiden kan; andere malen zijn talloze kristalletjes tot hoopjes verenigd, en nog andere malen zien we de kristallen afzonderlijk. Het is dus van belang ook de bouw der sneeuwvlokken als geheel te bestuderen. Ziehier enkele vormen:

I. bolletjes;
klompjes;
klompjes met veel uitsteeksels;
wollige klompjes met haarvormen;

II. naalden, soms afzonderlijke, soms 2 aan 2, soms een aantal bijeen;
afzonderlijke plaatjes, sterretjes, enz;
vlokken bestaande uit een aantal sterretjes.

Het grote verschil tussen de eerste vormen, waarin de kristallen niet meer te herkennen zijn, en de tweede groep, schijnt samen te hangen met de wind. Groep twee valt alleen als het betrekkelijk windstil is, zowel nabij de grond als in hogere lagen. De vlokken vormen zich klaarblijkelijk, doordat de afzonderlijke kristallen toevallig tegen elkaar aankomen, en zich dan aan elkander vasthechten.

De grootte der sneeuwvlokken kan zeer verschillend zijn. In bepaalde gevallen heeft men vlokken van 12 cm middellijn waargenomen.

156. Regelatie van de sneeuw.

Een handvol sneeuw, dat we flink samenpersen en kneden, wordt weldra één harde massa, bijna een stukje ijs. Verklaring: door de drukking daalt het smeltpunt van ijs; overal dus waar

twee kristalletjes tegen elkaar drukken smelten ze, om weer tot een geheel te bevriezen, zodra de drukking ophoudt. Men heeft aangetoond dat hierbij de kristallografisch gelijk gerichte vlakken aan elkaar groeien, en dat vooral het basisvlak zich sterk ontwikkelt en naburige andere vlakken tot basisvlakken vervormt. Geleidelijk verandert aldus de losse sneeuw in vast ijs. In de ongeschreven wet onzer straatjeugd staat het verbod, met dergelijke samengeperste sneeuwballen te gooien! - Op hetzelfde beginsel berust de vervaardiging ener ijsbaan, die ontstaat door al maar weer over hetzelfde sneeuwoppervlak te glijden, tot de bovenlaag in glashard ijs veranderd is.

Het is nu begrijpelijk, waarom bij zeer koud weer (beneden - 7°) de sneeuw ‘niet meer pakt,’ en niet meer tot ijsballen samen te kneden is: de drukking is niet meer voldoende om het smeltpunt onder de temperatuur der omgeving te doen dalen. Het geluid onzer voetstappen en der voorbijrijdende wagens klinkt nu heel anders dan we dat op sneeuw gewoon zijn: de sneeuw *kraakt* (blz. 60).

157. Sneeuw op de bomen.

Waar de sneeuw de boomstammen heeft getroffen, blijft er een witte band van een 20 cm breedte op de stam zitten. Met behulp hiervan en van het kompas is zeer nauwkeurig te bepalen uit welke richting de wind geblazen heeft. Het zou interessant zijn dit na een sneeuwstorm over een hele streek stelselmatig op te tekenen.

In een bepaald geval[1)] heeft men ruw gemeten hoeveel sneeuw er aan de boomtakken vastzat. De sneeuwcylinder was meer dan 10 maal dikker dan de twijg waaraan hij zat, het oppervlak van de doorsnede 100 tot 400 maal zo groot.

158. Veranderingen die zich in een sneeuwlaag afspelen. Uitvloeien op daken en pijlers.[2)]

In landen waar de temperatuur van de dikke laag gevallen sneeuw dagen lang beneden nul blijft, kan men prachtig nagaan, hoe de kristallen zich vervormen, aaneensluiten, en tenslotte in een samenhangende ijslaag overgaan: zo ontstaan de gletschers van het hooggebergte. Bij ons is een dergelijke studie uit de aard der zaak meer fragmentarisch; des te nodiger is het daarom, te

1) Nat. **43**, 318, 1891.
2) Vgl. Met. Zs. **4**, 72 en 225, 1887.

weten wat er waar te nemen valt bij ideale omstandigheden.

Reeds de eerste dag ziet men de mooie kristalsterretjes verdwijnen. De punten breken af; daarenboven verdampen zij iets sneller dan de overige delen van de kristallen, zodat hun damp 'overdestilleert' en de vooruitspringende hoeken vervangen worden door zachtere rondingen. De massa wordt vaster, de dichtheid neemt toe en bereikt 0,2 tot 0,3; de sneeuw is nu poedersneeuw geworden, zoals voor de ski-sport gewenst wordt. Geleidelijk groeien de grote korrels ten koste van de kleine, en vormen er zich onregelmatige bolletjes, aaneengesloten tot 'Firn-sneeuw.'

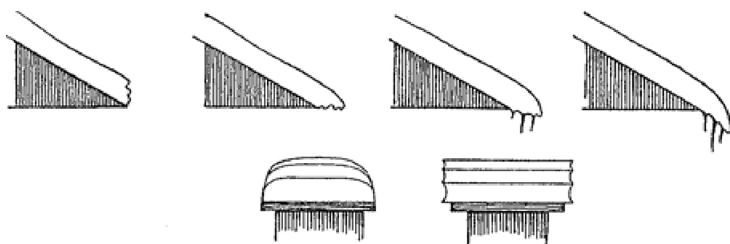


Fig. 69. Uitvloeien van de sneeuw op daken en pijlers.

De sneeuw bedekt zich met een samenhangende korst. Als men vroeg opstaat en *met de grootste voorzichtigheid* de sneeuw gaat bekijken, kan men soms waarnemen hoe de grote firn-korrels uit een opeenstapeling van zeshoekige kristalplaatjes zijn opgebouwd. Men moet vooral vermijden door de lichaamswarmte de fijne strukturen tot smelten te brengen: plaats u aan de kant naar waar de wind blaast ('onder de wind'), houd uw adem in!

Is de sneeuw dik genoeg en blijft hij geruime tijd liggen, dan is het de moeite waard een doorsnede van de laag te maken. Dikwijls ziet men dan hoe ze uit verscheidene horizontale lagen bestaat, ontstaan doordat de sneeuw in verschillende malen gevallen is, of doordat het verscheidene malen gedurende korte tijd gedooid heeft.

Bij hellende daken, zwaar met sneeuw beladen, ziet men de verschillende lagen zich aan de dakrand aftekenen (fig. 69). De volgende dagen daalt de massa geleidelijk, en de laag zwelt aan de benedenzijde van het dak. Wanneer zich daar ijspegels vormen, kan men zien hoe ze de volgende dagen meer en meer scheef gaan staan en zich krommen, naarmate de massa dóórzakt.

Als de vorst maar lang genoeg duurt, kan de sneeuw op onze daken tenslotte in echt gletscherijs overgaan!

In eenvoudiger vorm treedt hetzelfde verschijnsel reeds op, wanneer sneeuw op het bovenvlak van een stenen pijler rust. Ook hier kan men dikwijls de afzonderlijke lagen onderscheiden, en springt de sneeuw aan de randen meer en meer vooruit, terwijl de laag dunner wordt. Ditmaal is het echter duidelijk, dat het uitvloeien niet geschiedt onder de druk van de sneeuwmassa (wat men bij het dak had kunnen denken), maar blijkbaar door het smelten van een deel van de sneeuw, zakken van het smeltwater tussen spleten en capillairen, opnieuw bevriezen, enz.

159. Sneeuwfestoenen.

Een zeer zeldzaam verschijnsel! Als de temperatuur lichtelijk boven het vriespunt stijgt, wordt de sneeuw soms taai en plastisch; en dan komt het voor dat festoenen van sneeuw zich van de éne zijde van een raam naar de andere slingeren: in bepaalde gevallen waren ze tot 1 m lang en 10 à 15 cm dik.[1)] Of aan stenen balustraden ziet men de sneeuw bij elk pijlertje doorzakken, terwijl hij in de tussenruimten tussen de pijlertjes vastgehouden wordt.[2)]

Alleraardigste kleine sneeuwfestoenen ziet men soms aan prikkeldraad (fig. 70). Langs de draad loopt een rand van sneeuw; gaat het een weinig dooien, dan blijft hij nog wel hangen aan de vooruitstekende scherpe draadpunten, maar daartussen zakt hij door en hangt vrij in de lucht. Zo slingeren zich deze sneeuwfestoenen van punt tot punt als een winterse versiering. - Het is zaak, telkens als



Fig. 70. Sneeuwfestoenen aan prikkeldraad (1 Januari 1932, Bilthoven). Een voorbeeld van 'plastische sneeuw'.

de weersomstandigheden gunstig zijn, op zulke draadversperringen te letten!

Deze sneeuw bestaat niet meer uit sterretjes, maar uit grote, aan elkaar vastgekleefde korrels, zodat de massa op dichte witte suiker gaat lijken; door deze struktuur zijn de taaiheid en vastheid van deze sneeuwvorm te verklaren. Aan grote sneeuwfestoenen ziet men dat bij het doorzakken sneeuw van beide

1) Met. Zs. **6**, 120, 1889. - Wetter, **6**, 129, 1889; **24**, 141, 1907 - M.W.R. **63**, 162 en 315, 1935.
2) Met. Zs. **34**, 268, 1917.

uiteinden toegevoerd wordt, doordat afdrukken van twijgen, enz. zich geleidelijk naar beneden en naar het midden van het festoen verplaatsen.

160. Sneeuwrollen.[1)]

Als het niet te koud is (omstreeks 0°) en de sneeuw goed aaneenkleeft, vormt de wind soms ‘sneeuwrollen,’ die hij voor zich uit drijft, en die al rollend dikker worden. Men heeft er in de Ardennen gevonden, die tot 2 m lang en 1,50 m dik waren.[2)] Dikwijls zijn de kleinere meer bolvormig, de grotere cylindrisch, deze laatste dikwijls met een kleinere uitholling in elk der twee eindvlakken. Dat deze natuurlijke sneeuwballen werkelijk rollend zijn ontstaan, blijkt meestal uit het spoor dat ze in de sneeuw hebben achtergelaten, en dat soms nog 20 of 30 meter achter hen aan te volgen is. Ze liggen meestal met verscheidene bijeen, aan de lijzijde van de hellingen, waar de wind gemakkelijk enkele hoopjes sneeuw in beweging heeft kunnen brengen. In een bepaald geval heeft men waargenomen hoe een windstoot die slechts 1½ minuut duurde, voldoende was om meer dan 500 sneeuwrollen te doen ontstaan.

Beproef de sneeuwrollen na te maken! Boetseer een holle cylinder en rol hem voort over goed pakkende sneeuw; het spoor wordt hoe langer hoe breder en hoe dieper.

161. Smeltende sneeuw.

Van Benjamin Franklin wordt het volgende verhaal verteld. - Toen het gesneeuwd had en de zon daarna scheen, legde hij lapjes van verschillend gekleurde stof op de sneeuw, en merkte op dat ze weldra in de sneeuw begonnen te zakken. Het zwarte lapje zakte het eerst en het diepst, dan het rode, dan pas het witte. Inderdaad was dit te verwachten: want zwart, dat alle kleuren opslorpt, zal het meest door de zon verwarmd worden; wit, dat alle stralen terugkaatst, het minst; en rood daar tussen in. Helemaal afdoende is de redenering niet, omdat men niet zeker weet of de lapjes ook zwart en wit zijn voor het infrarode gedeelte van de straling. Telkens als de sneeuw gevallen is en de zon schijnt,

1) Clouston, Phil. Mag. **30**, 301, 1847. - Met. Zs. **6**, 153, 1889. - M.W.R. **27**, 100, 1899; **34**, 325, 1906. - Publ. Mens. Mogimont, **1**, 156, 1907. - Sc. Americ. **108**, 196. 1913. - Met. Zs. **48**, 399, 1931.

2) Bracke, Promenade dans la neige (Mons, 1907). Hier ook litteratuuropgaven.

kan men zien, dat elke steen, elk takje dat op de sneeuwlaag ligt, weldra met een zoom omringd is, waarin de sneeuw gesmolten is. Dit is de proef van Franklin zoals de natuur die voor ons klaarmaakt! Het smeltproces begint van af de stenen, omdat die veel straling opslorpen en dus warmer worden.

Natuurkenners hebben dikwijls opgemerkt, dat sneeuw waarop hazen gelegen hebben, nooit een spoor van smelting vertoont.[1] Zo slecht geleidend is de pels waarin deze dieren gehuld zijn!

Kan sneeuw op water vallen zonder te smelten? - Als 't water bij het vriespunt is, de sneeuw overvloedig en het weder windstil, kan werkelijk een soort ‘room’ gevormd worden die als ‘sneeuwschotsen’ op het water drijft. Het is een zachte, gemakkelijk te doorboren zelfstandigheid. Forel heeft zulk een vorming zelfs eenmaal waargenomen toen het wateroppervlak 5° boven nul was![2]

Bekijkt men aandachtig een laag gevallen sneeuw, dan ziet men dikwijls dat ze een arcering van evenwijdige groeven vertoont; soms zijn er twee stelsels strepen. Waarschijnlijk zijn dit de sporen van de wind, want hun richting is vrijwel overal dezelfde, en op plaatsen die goed tegen wind beschermd zijn, ziet men de strepenstelsels niet; als een harde wind volgt op korte vorst, rollen harde oppervlaktekorrels over de sneeuw en trekken er groeven in; misschien dragen de voortgejaagde regendruppels er ook toe bij.

Waarschijnlijk van andere aard zijn de merkwaardige evenwijdige voren die in een sneeuwlaag ontstaan, en die op hellend terrein evenwijdig aan de richting van het verval lopen; op een horizontaal oppervlak hebben zij allerlei grillige richtingen.[3] Dit verschijnsel treedt alleen op wanneer een laag oude sneeuw bedekt wordt met jonge sneeuw, en het dan gaat regenen. Het regenwater sijpelt door de poreuze jonge sneeuw, verzamelt zich in stroompjes aan het grensvlak oud-nieuw, al die stroompjes vloeien volgens de richting van de hellende grond en graven kleine voren uit. De jonge sneeuw zakt daar overal een beetje in, en vertoont dan het eigenaardige uiterlijk dat we beschreven.

Een andere typische vorm van smeltende sneeuw treedt op als de sneeuw wat vuil geworden is, en er heldere zonneschijn komt.[4] Er ontstaan dan naalden, punten, grillige spitsen,

1) Glaisher. Philos. Trans **137**, 153, 1847.
2) Arch. sc. phys. nat. **21**, 235, 1889.
3) Peterm. geogr. Mitt. **51**, 237, 1905. - Nat. **109**, 374, 1922.
4) M. Minnaert, Hemel en Dampkring, **16**, 153, 1919.

miniatuur-riffen tot 15 cm hoog, die naar de zon gericht zijn en in de loop van de dag de zon volgen. Blijkbaar was de sneeuw hier en daar door een weinig aarde tegen de straling beschermd, en is hij in de schaduwkegel van elk dezer schermpjes langzamer gesmolten dan elders. - In de Andes ontstaat op een dergelijke manier maar op veel grootser schaal de beroemde 'boetelingensneeuw.'

Het is altijd de moeite waard, op te merken in welke volgorde het smelten van de sneeuw gebeurt. In een bepaald geval bleef hij langer liggen op de dwarsliggers van spoorrails dan op de aarde daarnaast: blijkbaar was de grond warmer dan de sneeuw, en voerde hem warmte voor het smelten toe; terwijl het hout van de dwarsliggers de warmte slecht geleidt, zelf aan de bovenkant wat afkoelt, maar geen voortdurende warmtetoevoer leveren kan. In een ander geval was de sneeuw alleen blijven liggen op scherp begrensde vierkanten of cirkels, om enkele bomen van een laan: het waren bomen die kort geleden waren verplant, en de omgedolven aarde had blijkbaar andere thermische eigenschappen dan de omgevende grond (vgl. § 167).

In 't algemeen blijft de sneeuw langer liggen op beschaduwde plaatsen en daar waar hij tegen de warme dooiwind beschermd is, misschien ook daar waar de grond iets hoger is dan de omgeving, zodat het smeltwater van daar wegloopt en er niet blijft staan.

> Dergelijke waarnemingen kan men doen als de sneeuw begint te vallen; de witte laag vormt zich het eerst op hout, gras, losse aarde, en pas veel later op het goed geleidende asfalt van de rijweg.
> Op welk punt van uw omgeving blijft de sneeuw het langst van al liggen?
>
> Welke invloed hebben de aard van de grond, het plantendek, de nabijheid van water of moeras?

162. Fotograferen van sneeuwlandschappen.

Maak de opnamen liefst in de ochtend of laat op de namiddag. Altijd anti-haloplaten gebruiken! Belichtingstijd afmeten naar de witte partijen, om nog de zachte helderheidsverschillen in de besneeuwde oppervlakten te doen uitkomen. Als er ook donkere voorwerpen te zien zijn, waarin men enig detail wenst te verkrijgen, belichte men langer en gebruike zeer gevoelige platen, die gewoonlijk ook weinig kontrastrijk zijn.

Ontwikkelen met rodinal of glycine en een weinig broomkali. Zijn er ook donkere partijen, dan geen broomkali. In 't algemeen: streven naar negatieven die niet kontrastrijk en niet te dicht zijn.

Afdrukken op broomzilverpapier. Opplakken op donkere achtergrond.

163. Het meten van de hoeveelheid hagel.

Om te meten hoeveel neerslag er als hagel valt, kan men het hiernaast afgebeelde toestelletje vervaardigen[1)] (fig. 71). In een emmer plaatst men een inmaakglas. boven hangt men er met twee oortjes een hellende blikken (of beter zinken) plaat aan,

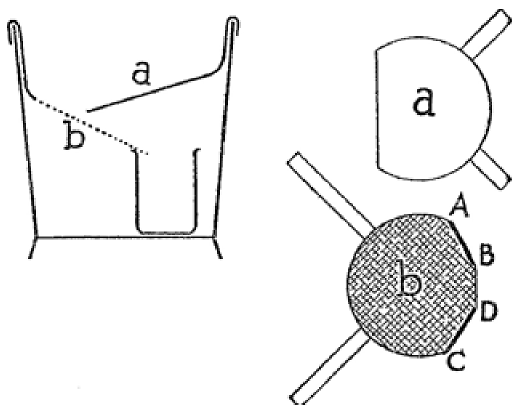


Fig. 71. Eenvoudige hagelmeter.

die iets meer dan de helft van de emmer bedekt. Daaronder komt dan een andere halve cirkel van metaalgaas, tegengesteld hellend, waarvan de mazen 2 tot 3 mm wijd zijn, en waarvan de randen AB, CD een weinig opwaarts gebogen zijn. - De regen valt door het metaalgaas, de hagel rolt erover en wordt door de opstaande kantjes naar het inmaakglas geleid. Men kan dan later het volume smeltwater bepalen.

> Bepaal met de hagelmeter hoeveel hagel er gevallen is gedurende een flinke hagelbui; schat het totale gewicht, en het aantal kgm arbeid die de natuur verricht heeft om die massa tot een hoogte van enkele kilometers op te heffen.
> Vergelijk de hoeveelheid hagel met de totale hoeveelheid neerslag die in den loop van een jaar valt: hij is er maar een uiterst klein breukdeel van.

1) Fenyi, Das Wetter, **42**, 301, 1925.

164. Hagelkorrels en hagelstenen.

Van ijs bevrijd zijn stroom en beken
Door de zachte, verjongende voorjaarswind;
In 't dal herleeft de groene hoop;
De oude Winter, zijn macht verliezend,
Trok zich in wilde bergen terug.
Van daar uit zendt hij ons vluchtend nog
Wat buien met korrels ijzige hagel,
In strepen over het groenende veld.

Goethe, Faust I, Paasochtendwandeling.

Men onderscheidt twee zeer verschillende soorten hagel: 1. *Losse hagel*: korrels van 2 tot 5 mm groot, sneeuwwit, zacht, zelden met een dun, doorzichtig ijslaagje er over heen; inwendig vertonen ze luchtbuisjes en luchtbelletjes; enkele zijn soms peervormig, doordat een korrel een onderkoeld waterdruppeltje ingehaald heeft en ermee versmolten is (dit zijn overgangen naar echte hagel). Losse hagel valt meestal in de lente, soms in de herfst, bij buiig weer, in 't algemeen bij dag, hetgeen bewijst dat hij gevormd wordt door snel opstijgende luchtstromen, zoals die bij plaatselijke verhitting ontstaan (vgl. cumulusvorming §123). Doordat de opstijgende lucht in dit jaargetijde vrij koud is, condenseert de damp ineens als sneeuw *gemengd met onderkoelde waterdruppels*. Een korreltje dat begint te vallen ontmoet op zijn weg een aantal onderkoelde druppels, die onmiddellijk stollen en er aan vastplakken; telkens wordt ook lucht mee ingesloten, tot er tenslotte een balletje zacht wit ijs gevormd is.

2. *Echte hagel*: de hagelsteen bestaat meestal uit een korrel losse hagel, omgeven door ijslagen die afwisselend doorzichtig en ondoorzichtig zijn; dikwijls is hij omgeven door een witte straalstruktuur, die soms uit goed ontwikkelde hexagonale kristallen bestaat. In zeldzame gevallen bevat hij verscheidene 'kernen' van losse hagel, in éénzelfde ijsklompje ingebed.[1)] Het is de moeite waard, enkele hagelstenen met een mes middendoor te breken, het breukvlak glad te schaven en een schets van de inwendige bouw te maken; met de loupe ziet men op de doorsnede overal onregelmatig geplaatste luchtbuisjes. Echte hagel valt meestal in de zomer bij onweders. Dit feit en de bouw van de hagelstenen brengen ons op het spoor van hun levensgeschiedenis. De opstijgende lucht was ditmaal vrij warm; als de waterdamp op een 1000 m begint te condenseren, vormen zich nevel-

1) Sc. **70**, 260, 1929.

druppeltjes, en pas op een 3000 m hoogte ontstaan sneeuwkristallen en daarna onderkoelde waterdruppels. Een vallend ijskorreltje verandert eerst in een korrel losse hagel; maar als die korrel daarna door lagen dringt waar onderkoelde waterdruppels zweven met een temperatuur onder het vriespunt, wordt hij omhuld met een laag doorzichtig ijs. Nu komt een nieuwe windstoot, en de hagelkorrel wordt opnieuw in de hoogte meegevoerd, tot in de regionen van de sneeuwkristallen: er komt weer een witte, ondoorzichtige laag op. En dan valt hij weer naar beneden, en stijgt weer, en zo herhaaldelijk, tot tenslotte de hagelsteen gevormd is en de aarde bereikt.

Het essentiële punt voor de hagelvorming is dus de sterke opstijgende luchtstroom. Daar we echter weten dat deze niet over de zee voorkomt (§ 123), begrijpen we nu ook waarom hagel op zee zo buitengewoon zeldzaam is[1].

Het gebied waarin het gehageld heeft, is bijna altijd een lange, smalle strook, in de bewegingsrichting van de bui; Goethe had dit reeds nauwkeurig opgemerkt (zie de aanhaling bij de aanvang van deze paragraaf)!

Het uiterlijk der hagelstenen is zeer afwisselend, dikwijls zijn ze ruw bolvormig, maar ze vertonen ook de vorm van pyramiden of kegels, lenzen of plaatjes, of ze zijn geheel onregelmatig. Omdat men zich zo gemakkelijk vergissen kan in de schatting der afmetingen, geeft men meestal op: ‘als erwten, knikkers, hazelnoten, duiveneieren, kippeneieren, citroenen; vuistgroot; als meloenen, als kinderhoofden.’ Een hagelsteen ‘als een duivenei’ bleek 11 gr te wegen; ‘als een kippenei,’ 23 gram; ‘als een kalkoenei,’ 69 gr (Tessier, 1788). Veel beter zijn natuurlijk echte afmetingen van gewicht en middellijn; grote hagelstenen kan men afgieten in gips.

Er is een betrouwbaar bericht van hagelstenen van 25 cm × 14 cm × 12 cm, die 2 kg wogen;[2] een ander van stenen van 21 cm middellijn;[3] een derde van stenen die 5 kg wogen!?[4] In Nederland is een steen gevallen van 10 cm middellijn.[5] Herhaaldelijk zijn reeds mensen, paarden, runderen door zulke ijsblokken gedood; kleinere hagelstenen zijn al gevaarlijk voor konijnen of eenden: tracht waar te nemen van welk gewicht af.

1) Ann. Hydr. **24**, 308, 1896.
2) Met. Zs. **42**, 408, 1925.
3) Hemel en Dampkring, **12**, 101, 1915.
4) Te Cette, in 1844.
5) Hemel en Dampkring, **16**, 87, 1918.

De grote hagelstenen boren ronde gaten in ruiten, zonder dat het glas barst, precies als was er een geweerkogel doorheen gegaan; bij niet te dunne ruiten bemerkt men hoe de onderrand van de opening mooi afgerond is, alsof het glas daar gesmolten was.[1)]

Bepaal de temperatuur van hagelstenen direkt na hun val, door een thermometer tussen enkele opeengehoopte hagelstenen te plaatsen. Dikwijls vindt men temperaturen *beneden* het vriespunt: wel een bewijs dat het zeer koud moet zijn in de luchtlagen waar de hagel gevormd is (vgl. § 98). Eenmaal werd een vlinder gevonden, met zijn pootjes in een hagelsteen ingevroren.[2)]

Onderzoek de stand der kristalassen in hagelstenen met gepolariseerd licht!

Breng hagelstenen onder water, en onderzoek of er bij het eind van het smelten uit elk een luchtbelletje te voorschijn komt. Het is nog niet zeker of dit de regel is; een dergelijk verschijnsel zou er op wijzen, dat het midden van de hagelsteen uit sneeuw bestaat, die met snel bevriezend water omringd is geworden. Blijft het verschijnsel uit, dan zou men veeleer denken aan een kern van bevroren water.[3)]

Er zijn oude berichten over een elektrische fosforescentie van hagelstenen, vooral van de eerste van de bui.[4)] Breng de hagelstenen snel onder een donkere doek en kijk of u ze zwak licht ziet uitzenden. Wacht u voor verwarring met St. Elmusvuur (§ 215)!

In *verscheiden goed waargenomen gevallen* zag men harde, ronde korrels losse hagel van 5 tot 6 mm middellijn dansende bewegingen op een vensterbank uitvoeren! Nadat ze gevallen waren bleven ze 1 *tot* 2 *sekunden onbewegelijk*, en *sprongen* dan ineens bijna loodrecht omhoog, soms 30 tot 60 cm. Het was alsof de korrels elektrisch geladen waren, de vensterbank oplaadden, en dan afgestoten werden. De eerste korrels van de bui vertoonden het effekt het sterkst.[5)]

1) C.R. **124**, 1405, 1897.
2) Met. Zs. **11**, 274, 1894.
3) M.W.R. **34**, 1906.
4) Arago, Oeuvres, **4**, 157 (Le Tonnerre). - C.R. **81**, 104, 1875.
5) Arch. sc. phys. nat. **10**, 113, 1893.

165. Het meten van de hoeveelheid dauw.[1)]

Maar voor de twee nymfen van de dauw, Hersè en Pandrosos, bouwden de Grieken te Athene de heiligste tempel van Athêna; de tempel voor hun eigene dierbare Athéna, voor haar en voor de dauw samen; zodat hij in twee delen verdeeld was: enerzijds de tempel van de godin der stad en anderzijds de tempel van de dauw. Zo werd haar macht uitgedrukt, als die van de lucht die de dauw brengt op de bergweiden, en dat in de centrale tempel van de Oudheid, de toekomstige intellektuele wereld beheersend.
*Ruskin, The Queen of the Air (Verz. werken, **19**, 335).*

W.Ch. Wells is de schrijver van het beroemde 'Essay on Dew' (Londen, 1814), een klassiek voorbeeld van de induktieve methode in de natuurwetenschappen. Deze amateur-meteoroloog vertelt van zijn talloze proeven en metingen met een onnavolgbare helderheid en frisse ontdekkingsvreugde, zijn werk bevat een onuitputtelijk aantal suggesties voor natuurwaarnemingen. Wells bepaalde de hoeveelheid dauw meestal met behulp van een hoopje losse wol, dat hem in zekere zin als 'standaardobjekt' diende, en dat ongeveer 5 cm in middellijn mat, terwijl het ca. 1 g woog. De gewichtstoeneming van die wol kon hij bepalen, en aldus kwantitatief nagaan hoe allerlei omstandigheden invloed hebben op de dauwvorming. Hij liet de bruikbaarheid der methode zien door volgende controleproeven. 1°. Een hoopje wol, op het gras gelegd, wordt niet merkbaar zwaarder dan een dergelijk hoopje in een schoteltje dat zelf op het gras staat; het water is dus niet capillair van het gras in de wol gekropen, maar heeft zich rechtstreeks in de wol gevormd. 2°. De wol heeft ook geen water aangetrokken op de manier van een hygroskopisch lichaam; want in zeer bewolkte nachten of onder de bescherming van een afdak neemt ze niet merkbaar in gewicht toe.

Met deze methode kan men echter niet onderzoeken hoe de bedauwing nog van de aard van het voorwerp afhangt. Al heel lang geleden had Boussingault er dit op gevonden: hij nam een spons, en veegde daarmee het gras af over een oppervlak van **4** m^2.[2)] Nog beter kan men een dubbelgebouwen stuk filtreerpapier van 30 cm × 33 cm voorzichtig tegen de onderzochte voorwerpen aandrukken, tot alle dauwdruppels opgezogen zijn.[3)]

1) S.W. Visser, Natuurk. Tijdschr. voor Ned-Ind. **88**, 229, 1928, met litteratuuroverzicht.
2) Flammarion, l'Atmosphère, 1888, blz. 610.
3) V. Parchinger, Met. Zs. **35**, 47, 1918.

De gewichtsvermeerdering van het filtreerpapier is de dauwval op 1000 cm^2; elke millimeter dauw komt dus met 100 g gewichtsvermeerdering overeen. In de werkelijkheid vindt men nooit dergelijke hoeveelheden, maar b.v. 0,1 mm, overeenkomend met 10 g gewichtsvermeerdering. Deze methode is de enige die als werkelijk fundamenteel kan beschouwd worden; ze heeft echter het nadeel, dat niet al de gevormde dauw meegemeten wordt, maar wellicht slechts 30% tot 60%.

De beste methode schijnt te zijn, dat men een dergelijk dubbel blad filtreerpapier reeds 's avonds op het gras legt, en 's anderendaags morgens de gewichtsvermeerdering bepaalt. Uitvoerige reeksen metingen hebben aangetoond. dat men dan resultaten krijgt welke volmaakt parallel lopen met die der vorige methode, maar aanmerkelijk hoger in absolute waarde zijn.

166. De vorming van de dauw.

> '*De invloed der gaswetten, de overvloed van mooie wisselwerkingen in de betrekkingen tussen damp, lucht, water, aarde en planten*; *het belang ook van de warmteopname door de onbegrensde ruimte, maken deze tak der meteorologie even belangwekkend als mooi*.'
> *R. Russell*.

Een karaf koud water die men in een warme, vochtige kamer brengt, bedekt zich met een aanslag van fijne druppeltjes doordat de waterdamp er op condenseert. Evenzo ontstaat de dauw in de vrije natuur. We herinneren ons, hoe we op een heldere nacht een thermometer gebracht hebben tussen de grashalmen van een weide, en hoe we daar een merkbaar lagere temperatuur vonden dan in de lucht op 1 m hoogte (§ 71). De grashalmen stralen warmte uit, koelen af, en als op een gegeven ogenblik de lucht die tussen hen in hangt mede afgekoeld is en met waterdamp verzadigd, begint de dauw neer te slaan. - We zullen laten zien dat deze eenvoudige theorie volkomen rekenschap geeft van talloze, schijnbaar grillige invloeden die de hoeveelheid dauw bepalen, en die soms op de verrassendste wijze samenwerken.

1. Dauw is alleen overvloedig bij heldere lucht. Wordt de lucht bewolkt, dan stijgt de thermometer in het gras en de dauwvorming houdt op. In een bepaald geval steeg aldus de thermometer van 7° beneden luchttemperatuur tot 1° beneden luchttemperatuur. In een ander sprekend geval was de temperatuur in het gras te half tien 's avonds 0°; 20 min. later was de hemel

bewolkt geworden en de temperatuur gestegen tot 4°; nog 20 min. later was de hemel weer onbewolkt en de temperatuur in het gras opnieuw 0°.

2. Op alle plaatsen waar men de gehele hemel vrij ziet, is de dauwvorming aanzienlijk, op beschutte punten is ze gering. Plaats op een grasveld een tafeltje, of een vel karton in twee gevouwen tot een dakje. Een handvol wol, boven op de tafel of op het dakje gelegd, blijkt door de dauw een 3 tot 5 maal grotere gewichtsvermeerdering te ondervinden, dan een dergelijk hoopje wol dat eronder gelegd, of beter tegen de onderkant zelf van de tafel of van het karton bevestigd wordt; in een bepaald geval was de wol boven de tafel 5° kouder dan die er onder. Doe een dergelijke proef met een open kartonnen cylinder, 80 cm hoog, 30 cm in middellijn, die vertikaal op het grasveld geplaatst wordt; wol binnen de cylinder wordt veel minder zwaar dan wol erbuiten. De invloed van zulke schermen bestaat daarin, dat ze ongeveer dezelfde temperatuur hebben als de grond, en dus evenveel (infrarode) straling terugzenden als de grond er hun toegezonden heeft. Bij heldere lucht speelt de dampkring de rol van absorberend en uitzendend scherm, maar de hierbij werkzame lagen liggen zeer hoog en zijn al zeer koud.
3. De afkoelende invloed der uitstraling komt niet tot zijn recht als er luchtbeweging is, die de reeds afgekoelde lucht afvoert en met de andere vermengt (alleen bij *zeer* vochtige lucht is een weinig beweging gunstig). Bij opkomende wind houdt het dauwen dan ook op, en kan reeds gevormde dauw zelfs verdwijnen. Dikwijls vormt zich de dauw alleen aan de lijzijde, in de windschaduw van struiken, molshopen, palen.

   Holten in stenen of in hout zijn bevoorrecht door de rust der lucht, maar men moet bedenken dat de uitstraling er allicht geringer is. In het algemeen zal de invloed der luchtbeweging dikwijls tegengesteld zijn aan die van de straling, en daartegen afgewogen moeten worden. De toppen van struiken en palen zijn soms meer bedauwd dan de zijkanten, tengevolge der uitstraling; maar de spitsen van dorens enz. bedauwen niet, omdat daar de invloed der luchtbeweging overwegend is.
4. Hoe vochtiger de lucht, hoe meer dauwvorming (bij overigens gelijke omstandigheden). Kort na regen is er meer dauw dan gedurende een lange periode van droog weer. Dauw is overvloediger in die heldere, rustige nachten welke gevolgd worden door mistige ochtenden, - want de ochtendmist bewijst dat de lucht vochtig was. Dauw is ook overvloedig op een heldere

ochtend na een bewolkte nacht, waarin de lucht weinig waterdamp verloren heeft. Bij overigens gelijke omstandigheden vormt zich meer dauw 's ochtends dan 's avonds: doordat de lucht kouder is geworden, is haar vochtigheidsgraad toegenomen. Als het in lang niet geregend heeft, de barometer hoog staat en de wind uit het Noordoosten blaast, kan men wel aannemen dat de lucht goed droog is; nu wijst de thermometer aan hoe een hoopje wol op een tafel verscheidene graden onder de luchttemperatuur moet afgekoeld zijn, eer de eerste dauwvorming optreedt. Vandaar dat men soms waarnemen kan hoe het gras 7° lager dan de lucht is, en er zich toch weinig dauw vormt; terwijl andere malen het gras slechts 3° kouder is, en er zeer overvloedige dauw ontstaat.

5. Stoffen die veel uitstralen en de warmte slecht geleiden koelen sterk af en kunnen weinig nieuwe warmtetoevoer van de grond krijgen, zodat ze sterk bedauwen. Het gras vertoont veel meer dauw dan de straatstenen, die men zelden bedauwd ziet; krullen, meer dan een houten plankje; het gras is soms 4° tot 5° kouder dan de onbegroeide grond ernaast, en wol op het gras verzamelt dan ook veel meer dauw dan wol op de aarde. Gladde metalen bedauwen zeer veel minder; neem proeven met verschillende platen die u op een grasveld legt, en vergelijk steeds met de bedauwing van het gras ernaast. Plak een houten latje onder een vlak stuk zilverpapier, en leg het geheel horizontaal buiten: de delen van het zilverpapier waaronder geen hout zit bedauwen het eerst. Een metalen plaat op de onbegroeide grond bedauwt dikwijls een weinig aan de onderkant, niet aan de bovenkant; want zij neemt ongeveer een gemiddelde temperatuur aan tussen die der lucht en die der aarde; de onderkant is dus kouder dan de vochtige lucht die van de aarde opstijgt. Om dezelfde reden wordt een glazen plaat bedauwd aan de onderkant, als men ze over een aarden pan legt die water bevat en op de grond staat. Evenzo zijn stenen of keien op de grond meest alleen aan de onderkant bedauwd, want ze zijn vrij goede warmtegeleiders; dit is de reden waarom het onder een steen altijd vochtig is, en waarom insekten, duizendpoten, wormen daar hun verblijf kiezen! Stukken glas op grasgrond bedauwen ook, vooral aan de onderkant; papier vertoont minder verschil; bladeren die op de grond liggen (ook die van de paardebloem, de weegbree) zijn onder en boven ongeveer evenzeer bedauwd (deze waarnemingen bevestigen tevens dat de waterdamp althans ten dele uit de grond kont). Bladeren van de lage planten zijn echter meer aan de bovenkant dan aan de onderkant bedauwd.

Met behulp van deze vóórkennis kunnen we nu allerlei ingewikkelde dauwverschijnselen gaan begrijpen, die dikwijls door de samenwerking van verschillende faktoren te verklaren zijn. - De overvloedige bedauwing van gras bijvoorbeeld is aan de volgende oorzaken toe te schrijven: 1. het straalt sterk uit; 2. tussen de sprietjes is er bijna geen wind; 3. de lucht tussen het gras heeft een hoog gehalte aan waterdamp. Op heidekruid of droge varens ontstaat zelden dauw, evenmin op de vleugeltjesbloem (Polygala); daarentegen veel meer op de leeuwenklauw (Alchemilla). De verhouding van oppervlak tot volume en het vochtigheidsgehalte van de lucht tussen de planten, de sterkere of geringere zodevorming enz. spelen hier natuurlijk een rol. - Komt dauw ook op 't gebladerte van bomen voor? Soms wel, maar zelden. Verklaring: 1. op die hoogte is de lucht verscheiden graden warmer dan bij de grond; 2. daar is meer wind dan beneden; 3. de lucht is daar droger; 4. de bladeren beschermen elkaar tegen de uitstraling; 5. zodra de lucht boven een blad afgekoeld is vloeit ze gemakkelijk weg en hoopt zich niet op.

Komt de waterdamp die als dauw neerslaat uit de vochtige aarde of uit de lucht? Hierover is ontelbare malen geredetwist! Feitelijk overweegt nu eens de ene, dan eens de andere faktor, maar gewoonlijk is de damp uit de grond de hoofdzaak. - Keer een drinkglas onderste boven, en zet het op onbegroeide aarde: het bedauwt aan de binnenkant; de waterdamp moet dus uit de grond gekomen zijn. Deze proef gelukt zelfs over droge aarde en droog zand, maar dan vormt zich toch minder dauw; over gras integendeel is de dauw overvloediger. Zet over het drinkglas nog een stolp, en vul de ruimte tussen de twee met een slecht geleidende stof: de proef gelukt ook nu. Zet echter in de tuin een omgekeerd drinkglas *op een bord*: er vormt zich geen dauw in het glas meer; de waterdamp was dus bij onze eerste proef wel uit de grond gekomen. Doe deze proeven ook boven een pan gevuld met tuinaarde en op de grond neergezet: als het glas bedauwd is en weggenomen wordt, blijkt dat de pan gewicht verloren heeft.[1)] Tegenover deze waarnemingen staat nu echter: 1. dat er af en toe wel degelijk ook dauw aan de buitenzijde van het drinkglas afgezet wordt; 2. dat we de invloed van de algemene vochtigheid der lucht op de dauw al hebben vastgesteld; 3. dat men de daken der huizen meermalen

1) Nat. **33**, 256, 1886.

berijpt kan zien, en er dus geen twijfel aan is dat ze andere malen bedauwd moeten zijn.

Veel mensen denken dat de dauw zich 's ochtends vormt. Niets is minder waar; De dauwvorming kan op beschaduwde plaatsen en bij heldere, rustige lucht al in de late namiddag beginnen; uren vóór de zon ondergaat voelt het gras dan al vochtig aan. Reeds kort na zonsondergang wordt de dauwvorming al zeer overvloedig; ze houdt de hele nacht aan, althans als het weder niet omslaat. Omstreeks zonsopgang vormt zich nog veel dauw, maar dan is het proces afgelopen.

Op sommige warme, mooie herfstdagen, als de lucht tamelijk vochtig is, ziet men soms hoe de straten die in de Oost-Westrichting lopen aan hun nog beschaduwde Zuidzijde geheel vochtig zijn, terwijl de Noordzijde, die door de zon beschenen wordt, droog blijft. Bij deze heldere herfstlucht is de uitstraling blijkbaar zo sterk, dat de grond reeds bij dag onder het dauwpunt afkoelt (vgl. § 167).

Niet te verwarren met dauw zijn de fijne druppeltjes die overal neerslaan wanneer er mist hangt: de condensatie heeft hier niet plaats gehad op voorwerpen die door straling warmte hadden verloren, maar is in een luchtlaag van aanmerkelijke dikte gebeurd. Het is begrijpelijk dat de zachtjes dalende druppeltjes vooral de bovenzijde van allerlei voorwerpen met een ‘valse dauw’ bedekken. - Dan zijn er ook de druppeltjes die veel planten zelf uit hun bladeren persen: ze verschijnen vooral bij vochtige lucht en zitten meestal op een rijtje langs de rand van het blad; dauw daarentegen bevochtigt het gehele oppervlak.

Men heeft wel eens beweerd dat er in 't Zuiden van Engeland vijvertjes zijn die door de dauw gevoed worden.[1)] De theorieën over deze ‘dew ponds’ berusten echter op niets dan fantasie. Merk maar op dat de bodem van drijvende roeiboten 's ochtends geen dauw vertoont, ook op dagen dat het aan de wal zwaar gedauwd heeft. 's Nachts is het water immers *warmer* dan de lucht, zodat er geen dauw op neerslaat! (§ 64).

167. Rijp (= Reif, hoarfrost, gelée blanche).

Rijp vormt zich evenals dauw op heldere nachten. maar wanneer de voorwerpen *onder het nulpunt* afgekoeld zijn, zodat de damp rechtstreeks in ijs overgaat. Evenals bij de dauw is het de moeite waard zich af te vragen: waarom is dít voorwerp

1) Geogr. Journ. **34**, 174, 1909. - M.W.R. **35**, 572, 1907.

met rijp bedekt en dat àndere niet? Door de witte kleur van de rijp zijn de verschillen zoveel opvallender dan bij dauw, al komen de verschijnselen in hoofdzaak op hetzelfde neer.

a. De uitstraling speelt een belangrijke rol. Daarom ontstaat vooral rijp aan de *boven*kant der bladeren, aan dunne voorwerpen, vooral op horizontale oppervlakken zoals de daken der huizen. Bij zwakke rijpvorming kan men opmerken dat er om alleenstaande huizen dikwijls geen rijp voorkomt, terwijl hij zich wel vertoont van een afstand van enkele meters af: de binnenste gordel was al merkbaar tegen uitstraling beschermd door het huis.[1)] Op hobbelige zandwegen, op duinhellingen zijn het altijd de toppen der hobbels en de vooruitstekende bochten die rijp dragen. Het is buitengewoon merkwaardig om op een heldere, rustige nacht, gewapend met thermometer en zaklantaren, de temperatuur van het zandoppervlak van punt tot punt te onderzoeken; hobbeltjes van een paar centimeter hoog zijn al $0^o,5$ tot $1^o,0$ kouder dan de miniatuur-dalen ertussen! Vandaar dus het verschil in de rijpbedekking.

b. Hierbij komt de invloed van de warmtegeleiding. Dwarsliggers van een spoorweg vertonen rijp, de aarde daarnaast niet; klaarblijkelijk geleidt het hout zo slecht, dat het verlies door uitstraling niet van uit de grond aangevuld wordt. Ook als de laag aarde zo hoog ligt dat ze de dwarsliggers bedekt, blijft het verschil duidelijk bestaan. - Op een plaats waar bomen in de herfst waren uitgehaald, had men de putten met aarde bijgevuld, en ze waren op het oog niet te onderscheiden van de omgeving; toch werden ze in de lente kenbaar aan de veel overvloediger bedekking met rijp.[2)] De bijgevulde aarde was stellig losser gebleven, en had daardoor een geringer geleidingsvermogen. In 't algemeen komen aldus bij rijp allerlei wijzigingen in de samenstelling van de grond te voorschijn, ook al bevinden ze zich op een zekere diepte. Neem hierover proeven! - Evenzo kan men soms aan het rijpneerslag op oude treinwagens zien hoe de balken inwendig lopen; vooral als men schuin tegen zo'n rijplaag kijkt onderscheidt men zelfs de kleinste verschillen in de aard van het neerslag.

Als de zon op de rijp schijnt, smelt deze snel. De schaduw van een boom, van een muur tekent zich scherp af, doordat de rijp daar langer blijft liggen (fig. 72). Kijkt men goed, dan

1) Sitzungsber. Berlin 1918, blz. 806.
2) R. Geiger, das Klima der bodennahen Schicht (Vieweg 1927).

ziet men dat er toch nog een klein strookje rijp in de zon ligt: de zon draait namelijk, de schaduwgrens verschuift, en eer de rijp helemaal gesmolten is, is de zon alweer een eindje verder gekomen. Schat de breedte AB van de rijpstrook die nog in de zon ligt, en de hoek ACB waarmee die overeenkomt, bereken hoeveel tijd de zon nodig gehad heeft om die hoek af te leggen! De zon verplaatst zich met een snelheid van ongeveer 1/100 rad

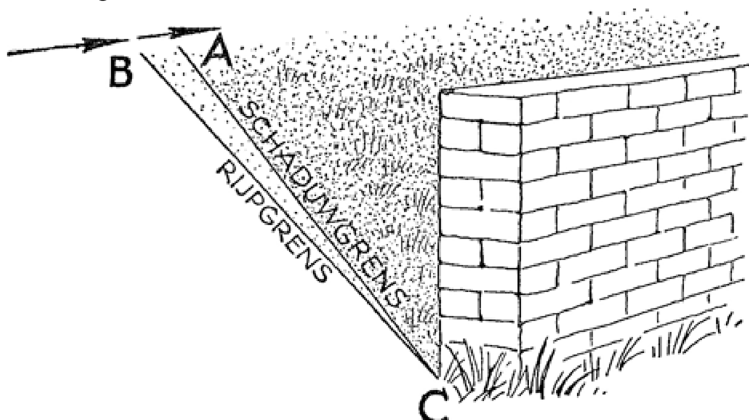


Fig. 72. Het verschuiven der schaduwgrens over een berijpt weiland.

in 2 minuten, maar de hoek waarover de schaduw verloopt is in 't algemeen kleiner; met een beetje boldriehoeksmeting kunt u dit precies berekenen, maar u kunt ook gedurende tien minuten de schaduw volgen en proefondervindelijk bepalen hoeveel ze verloopt. Hieruit vindt u dan, dat de rijp enige minuten nodig gehad heeft om te smelten.

Op een herfstmorgen, bij heldere lucht en zon, viel de schaduw van boomstammen en palen over een weiland. Overal waar er schaduw was lag rijp, elders niet; het was bijna alsof de weide een foto van de palen vertoonde; Deze waarneming, die men dikwijls kan doen, bewijst dat in de gegeven omstandigheden rijp *voortdurend nieuw gevormd* wordt in de schaduw; anders is het niet denkbaar dat zulke smalle objekten een rijpschaduw zouden geven, aangezien de zon enige minuten vroeger en later al diezelfde delen van de weide bestraalt. Ook hier was een faseverschuiving van ongeveer 1/50 rad. duidelijk te zien.

168. Vormen van de rijp (Plaat X)[1).]

Er zijn twee hoofdvormen van rijpkristallen, die vrijwel nooit gemengd zijn, en die over grote afstanden op gelijke wijze voorkomen. De *zuiltjes* ontstaan, als de temperatuur van het dauwpunt zo hoog is, dat eerst kleine waterdruppeltjes neerslaan, die bij verder dalende temperatuur bevriezen, en waaromheen zich dan de echte rijp afzet; dit is bijvoorbeeld de vorm die langs beken en sloten en op vochtige plaatsen optreedt, als er in 't voorjaar of in de herfst nachtvorst komt. *Plaatjes* ontstaan, als de temperatuur van het dauwpunt zo laag is, dat de waterdamp van de aanvang af rechtstreeks in ijskristalletjes neerslaat: deze vorm ontstaat meestal op droge voorwerpen in de winter. Bij de eerste nachtvorsten, laat in de herfst, vormen zich staafjes; houdt de nachtvorst aan, dan verschijnen na een paar dagen plaatvormige verdikkingen aan het uiteinde der staafjes (fig. 73*a*); en kort daarop reeds vormen zich uitsluitend zuiltjes.

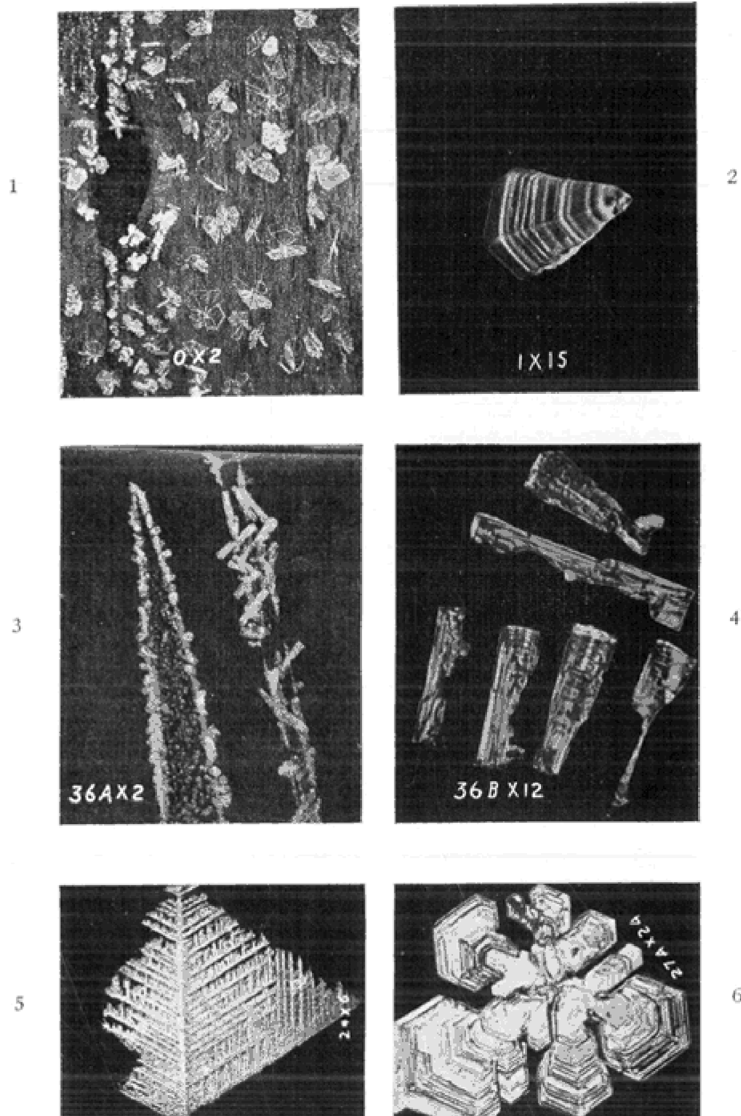
Deze verschillen schijnen terug te brengen tot de mindere of meerdere oververzadiging van de waterdamp. Bij aanzienlijke oververzadiging hebben de kristallen neiging de zuilvorm aan te nemen, dikkere uiteinden te vormen, zich bekervormig uit te hollen of spiraalsgewijs op te rollen: het worden ‘kristalskeletten’, zoals de sneeuwsterretjes en de bekende ‘zoutschuitjes’ waarvan de hoeken en ribben het snelst groeien, terwijl het overige van het kristalvlak die groei niet volgen kan.

De kristalvormen van de rijp gelijken ieder voor zich sterk op de overeenkomstige vormen van sneeuwkristallen; ze hebben dergelijke luchtinsluitingen enz.; maar de rijpkristallen zijn minder regelmatig ontwikkeld, doordat ze niet vrij zweefden in de ruimte, maar op oneffen oppervlakken groeiden. Het is opvallend, dat op één zelfde ogenblik geheel andere kristalvormen van de rijp ontwikkeld zijn op beukebladeren dan op esdoorn- of klimopbladeren: blijkbaar heeft de aard van het oppervlak invloed.

De volgende onderverdelingen zijn natuurlijk zeer willekeurig, maar geven toch een denkbeeld van de grote vormenrijkdom.

1. *Opstaande plaatjes*. - Zeer algemeen, bij matige vorst (- 1° tot - 10°), aan de rand van holten in de sneeuw, onder ingesneeuwde blokken hout, onder het deksel van regentonnen, op gras en bladeren, op planken. De zeshoekjes staan van de

1) Prins, Ciel et Terre, **15**, 499, 1895. - W.A. Bentley, M.W.R. 35. 348, 1907. - G. Stüve, Beitr. z. Geoph. **32**, 326, 1931. - Nakaya, t.a. pl.



PLAAT X Rijpkristallen.
1, 2. Opstaande plaatjes. - 3, 4. Holle en volle zuiltjes. 5. Boomvormen. - 6. Stervormen.

Naar W.A. Bentley, M.W.R. **35**, 348, 1907.

groeibodem af, los in de lucht, en zijn dikwijls samengesteld uit delen van grotere en kleinere zeshoeken.

2. *Enkelvoudige plaatjes*. - In dergelijke omstandigheden als 1, maar veel zeldzamer. Ze vormen zich om een ijskorreltje en groeien evenwijdig aan het oppervlak van de groeibodem, 1 tot 3 mm groot wordend. Ze gelijken sterk op de overeenkomstige sneeuwkristallen.
3. *Driehoekige plaatjes*. - Zoals 2., maar van de zeshoeken is maar één zesde gedeelte ontwikkeld, en wel als driehoekje.
4. *Boomvormen*. - Bij felle vorst (- 18° en lager). In schuren, op spinnewebben, strohalmen, op varens of gras aan de oever van vijvers, op balken in stallen (gecondenseerde waterdamp die door het vee uitgeademd is), om holten in de sneeuw. Zeer fraaie vormen!
5. *Grof vertakte boomvormen*. - Bij felle vorst, vooral op het oppervlak van het ijs, op bomen. De rijpvormingen staan meestal rechtop.
6. *Stervormen*. - Verschijnen in dezelfde omstandigheden als de enkelvoudige plaatjes 2.;

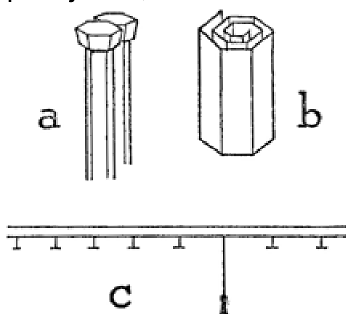


Fig. 73. Enkele rijpvormingen. *a*. Zuiltjes met plaatvormige verdikkingen (zeer algemeen); *b*. spiraalprisma's (zeldzaam); *c*. merkwaardige vorming onder het ijs in een karrespoor.

dikwijls zeer asymmetrisch ontwikkeld.

7. *Holle zuiltjes*. - Bij lichte nachtvorst, op gras, aan de rand van bladeren, 's winters in vochtige holten. Afmetingen: 2 tot 4 mm.
8. *Volle zuiltjes*. - Zoals 7.; bij zeer koud weder worden deze kristallen naaldvormig of vezelig. Ze liggen plat op de grond of op het ijs.
9. *Trechterties*.[1)] - Bij matige vorst op allerlei plaatsen: onder de ijskorst in karresporen, onder de ijskorst van bevroren plassen als er een luchtruimte is tussen water en ijs, in koelkamers van schepen en brouwerijen. Men ziet met de loupe hoe zich aan de ribben knobbeltjes hebben gevormd, die het begin van

1) Nat. **50**, 600, 1895. - Arch. sc. phys. nat. 5, 365, 1898. - Beitr. z. Geophys. **32**, 326, 1931.

nieuwe kristallen zijn. Samengestelde vormen, bijvoorbeeld de combinatie van een trechtertje met een hol zuiltje, komen vrij algemeen voor. - Vgl. Plaat XI, 2.

10. *Spiraalprisma's*. - Een zeldzame vorm! Lengte 6 tot 18 mm, doorsnede 1,5 mm (fig. 73 *b*).

Een merkwaardige rijpvorming wordt soms gevonden onder de ijsplaten aan de oever van de sloten, of onder het ijslaagje dat zich in karresporen vormt; het is wel zaak, dikwijls op die plaatsen te gaan speuren, want verrassingen kunnen ons daar wachten! In een bepaald geval (fig. 73 *c*) zaten er onder tegen het ijs korte uitsteekseltjes met een plaatje eraan; al die uitsteeksels met hun plaatjes waren gelijkelijk georiënteerd over een gegeven gebied van het ijsoppervlak; daarbuiten ging de oriëntering ineens in een andere over, zodat men zien kon dat de ijslaag uit een soort ‘kristalmozaiek’; bestond met zeer grote elementen (§ 183). Daartussen hing hier en daar een kristalletje aan een buigzame dunne draad, tot 1 cm lang!

Eenmaal heb ik waargenomen hoe zich 's nachts een rijplaagje van 2 tot 3 mm dikte

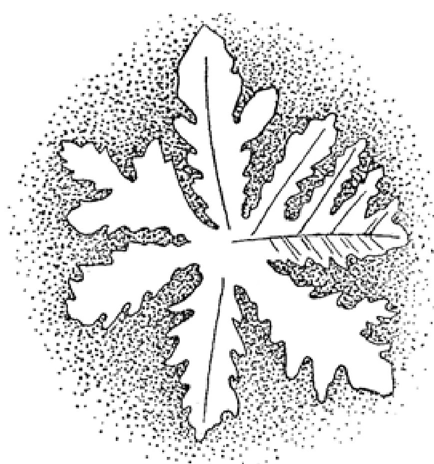


Fig. 74. Rijpsterren op zandgrond (ware grootte).

gevormd had onder dorre bladeren die hier en daar op de grond lagen. Op sommige plaatsen raakten 's ochtends de bladeren los (een beetje zonnestraling, wind), en men zag de rijplaagjes in bladvorm en met al de bijzonderheden van nerven enz. als afdrukken op de grond.

‘Sneeuwrijp’ vormt zich op en onder het oppervlak van oude sneeuw, die verdampt, maar waarvan de damp bij koud weer opnieuw neerslaat.

In industriecentra kan de rijp er soms grijs, ja bijna zwart uitzien, tengevolge van de grote hoeveelheid roet die hij bevat.

In sommige gevallen zijn er rijpbloemen waargenomen van 1 tot 3 cm middellijn, in bepaalde ijsgrotten zelfs exemplaren van 10 cm! Prachtige ijssterren, zoals de hiernaast *op ware grootte* getekende (fig. 74), hadden zich gevormd bij temperaturen om het vriespunt op zandgrond te Bilthoven, waar men een emmer water had uitgegooid. Over een oppervlak van ½ m^2 zaten er een honderdtal van dergelijke grootte, ternauwernood 1 mm dik; ze rustten ten dele op de grond, ten dele zaten ze vast aan enkele keitjes en zweefden enige millimeters boven het aardoppervlak. Waarschijnlijk was het water in de grond gedrongen, verdampt, en de damp weer gecondenseerd aan het oppervlak, dat door nachtelijke uitstraling afgekoeld was. Een soort rijp dus op grote schaal.

Uit de gegeven voorbeelden kan men zien op welke plaatsen men de jacht op rijpvormen moet ondernemen. Gebruik een loupe en wees heel voorzichtig, anders smelten de kristallen al door uw nabijheid! Fotografeer bij verschillende vergrotingen tegen een donkere achtergrond! Twee opnamen met éénzelfde camera, waarbij het berijpte objekt de tweede maal over 5° gedraaid is, kunnen stereoskopisch verenigd worden en geven een groot genot.

169. Ruwe rijp of ruigvriezen (= Rauhfrost, silverthaw, givre).

Het ruwrijmt, het brimmelt ....

G. Gezelle, Tijdkrans.

Iets geheel anders dan gewone rijp! Ruwe rijp ontstaat, als er mist hangt bij een temperatuur onder het vriespunt. De kleine waterdruppeltjes blijven dan onderkoeld, tot ze door de wind tegen een of ander vast voorwerp gedreven worden en daar stollen. Het verschil tussen *ruwe rijp* en *rijp* komt dus overeen met het verschil tussen mist en dauw. Ruwe rijp slaat altijd neer aan de zijde vanwaar de wind waait, en groeit tegen de wind in. Zelden vormt er zich ook wat aan de achterzijde van de voorwerpen, en dan nog alleen omdat de wind wervels om elke hindernis vormt; de fijnste luchtstromingen worden aldus door het rijpneerslag geregistreerd.

Daarentegen heeft de warmtegeleiding of de uitstraling geen invloed op de afzetting van ruwe rijp (- verschil met gewone rijp! -); hout of metaal onderscheiden zich in dit opzicht niet

van elkaar. Alleen in bepaalde gevallen, n.l. wanneer de nevel veel warmer is dan de vaste lichamen, bemerkt men dat de voorwerpen met geringe warmtecapaciteit snel verwarmd worden door de zich afzettende druppeltjes, zodat men bijvoorbeeld ziet dat de bladeren *nat* zijn; terwijl voorwerpen met grote warmtecapaciteit, zoals stenen, pijlers, dikke planken, balken, koud blijven en wit worden. De inwendige struktuur van de wand der treinwagens, van schuttingen kan aldus te voorschijn komen, maar als 'negatief' beeld van wat de gewone rijp vertoonde.

Opvallend is, hoe er zich des te meer ruwe rijp afzet naarmate de voorwerpen sterker gekromd zijn (bolle zijde naar



Fig. 75. IJskammetje van ruwe rijp aan een twijgje.

buiten). Aan de bladeren zijn de randen berijpt en de uitstekende nerven aan de onderzijde; mooi is dat bij klimop! Omlaag aan de boomstammen is er weinig rijp, maar hoger is er meer, en de fijne vertakkingen en uitlopers bij de top dragen het meest; in de ochtendzon is zulk een berijpte boom een glorieus gezicht! Men heeft draden uitgespannen met dikten van 0,5 tot 8 mm; na enige uren wordt de dikte van het rijpneerslag geschat: zij is het grootst op de dunste draden[1]. De ribben van vierkante palen zijn berijpt, terwijl de zijvlakken bijna geen rijp vertonen. Het schijnt mij toe dat in dit geval de verschijnselen te begrijpen zijn uit de verhoogde toevoer van zwevende druppeltjes naar vooruitstekende punten, veeleer dan door de sterkere afkoeling welke die punten ondervinden.

De ruwe rijp groeit zo zuiver in de windrichting, dat hij tegen elk twijgje een echt *ijsmesje* vormt (fig. 75); het bestaat uit dichte, evenwijdige ijsvezels, als een kam van verscheiden millimeters, soms een paar centimeters breedte. Als de windrichting tijdens de rijpvorming veranderd is, vertonen deze vezels een knik. Het zou de moeite waard zijn, de waarnemingen van Asmann over te doen,[2] die rechtstreeks het groeien van ruwe rijp onder 't mikroskoop heeft gevolgd. Hij had zijn instrument buiten gebracht, zodat het goed afgekoeld was, en had nu op de objektdrager een haartje bevestigd waarop hij druppeltjes zag neerslaan. Hoewel de temperatuur -10° was, waren de druppeltjes nog

1) G. Reboul, C.R. 331, 1918.
2) Met. Zs. **2**, 46, 1885.

vloeibaar; enkele verdampten zodra ze neersloegen, andere bevroren tot ijsklompjes die zich opeenstapelden. Aan die ijsklompjes was geen kristalvorm te zien, maar de opeenstapeling in de windrichting maakte voor het ongewapend oog de indruk van een kristallamel. We weten tegenwoordig wel dat elk van die ijsklompjes zelf uit kristalletjes bestaat, maar die zijn blijkbaar uiterst klein en geheel onregelmatig gericht. Toch ziet men naast deze meest voorkomende vormen van ruwe rijp ook wel echte kristallijne vormen, vooral bij zeer lage temperatuur: tegelijk schijnen waterdamp èn onderkoelde druppeltjes neer te slaan.

Bij nevel en haast volslagen *windstilte* groeien er lange ijsnaalden, van 1 mm tot 1 cm groot, die loodrecht van de twijgen der planten afstaan. Tussen die naalden is er geen rijp neergeslagen.

Bij uitzonderlijke gevallen van zeer sterke rijpvorming is het de moeite waard het gewicht te bepalen van de takken en twijgen, eerst mèt, dan zònder rijpbedekking. Men heeft gevallen gezien waarin de verhouding 10:1 werd, bij Rhododendron zelfs 35:1. Blijkbaar zijn de takken zo stevig, dat er voor de meeste planten praktisch nooit gevaar is dat ze breken.

Ruwe rijp is het mooist, wanneer de zon door de nevel breekt en elke boom, elke struik in sprookjespracht doet glinsteren onder de blauwe lucht. Tot na enkele uren de rijp in de zon gaat smelten en afvalt ....

Na de rijp vindt men dikwijls aan de voet van bomen en struiken grote aantallen vlakke ijsplaatjes, bijna zuivere rechthoeken of parallelogrammen. Het zijn de vlaggetjes ruwe rijp, die door het dooien afgevallen zijn en tengevolge van hun vezelige struktuur zo netjes zijn afgebroken.

Fotografeer een met rijp beladen tak op een antihalo-plaat tegen donkere achtergrond (open deur van een schuur). Rijplandschap: met geelfilter! Is er geen donkerder achtergrond te vinden dan de blauwe hemel, dan ortho- of panchromatische platen kiezen. Rijp fotografere men altijd 's morgens vroeg, - 's middags is hij gesmolten!

Krystalen woestijne
vol wondren, vergunt
me eene ure uw genot nog:
och arme, ge en kunt!
De zonne is gerezen,
de wreede, zij velt
omleege al uw schoonheid,
o wintersch geweld!

G. Gezelle, Tijdkrans.

170. IJzel.

1. IJzel kan ontstaan als de grond door strenge koude onder het vriespunt is afgekoeld, en een warme, vochtige luchtstroom langs de aarde strijkt; wellicht valt er ook regen. De grond bedekt zich nu met een dunne ijskorst die verraderlijk glad is, soms vertonen ook muren en bomen een dergelijk, maar veel dunner ijslaagje. Op de gladde beukestammen ziet men het best, hoe het uit kristallijne zuiltjes van slechts 1 tot 2 mm hoogte bestaat; waar de laag erg dun is zijn het ijsstippeltjes. De dunne takken nemen weldra de temperatuur van de regen aan, en vertonen dus geen ijzelbedekking. - Het is meestal aan het eind ener vorstperiode dat deze vorm van ijzel voorkomt; men kan veilig voorspellen, dat hij ten hoogste enkele uren duren zal.

2. Een andere vorm van neerslag die gewoonlijk ook ‘ijzel’ wordt genoemd, ontstaat op geheel verschillende wijze. Regen kan bevriezen, ook al is de temperatuur van de lucht en van de vaste voorwerpen nog iets boven nul: wanneer een betrekkelijk droge en krachtige wind blaast, verdampt het waterlaagje zo snel dat het tot ijs gaat stollen.[1)]

3. Tenslotte is er nog het zeldzame geval, dat regendruppels door koude luchtlagen zijn gevallen en daarbij onderkoeld, zodat ze stollen zodra zij vaste voorwerpen bereiken. In tegenstelling met ruwe rijp zijn hier de druppels zo groot, dat ze vervloeien voor het bevriezen; ze vormen dus geen naalden, maar een doorzichtig fijn ijslaagje dat de grond bedekt, elk blaadje, elk sprietje, elke draad omhult. Zodra men buiten komt legt zich ijs op de paraplu. Wanneer de grond iets warmer is dan 0°, vormt de onderkoelde regen soms toch een ijslaagje. maar dan meestal alleen op takken en twijgen. In elk geval stolt eerst slechts een gedeelte (smeltingswarmte komt vrij!); het overblijvende water stolt echter weldra ook, doordat het in de wind verdampt en daardoor afkoelt.

Soms is de ijsafzetting zo groot, dat zich ijspegels vormen aan de horizontale en schuine boomtakken, ja dat hele bomen doorbuigen als één massa; takken breken, hetzij door het gewicht van het ijs, of door de vorst die ze brozer maakt, of door de wind, of veeleer door de combinatie dezer oorzaken. Toch is de weerstand der bomen tegen zulke drukkingen verwonderlijk groot; in een bepaald geval droegen de twijgen van een iep

1) Vgl. W. Bleeker, Hemel en Dampkring **35**, 89, 1937.

zonder te breken tot 40 en 50 maal hun eigen gewicht aan ijs[1]; takken van perzik, Tsuga, esdoorn, tot 35 maal hun gewicht.[2] Het is niet aannemelijk dat de bomen aan een zo zeldzaam verschijnsel aangepast zijn; blijkbaar is het hun weerstand tegen winddruk die hun hier te stade komt.

171. IJskorrels.[3]

Dit zijn glasharde, doorzichtige ijsbolletjes van 0,3 tot 4 mm middellijn, soms enigszins puntig, soms met een wit kapje, soms helder, soms twee aan twee aaneengehecht. Slechts in één geval heeft men een vorm waargenomen

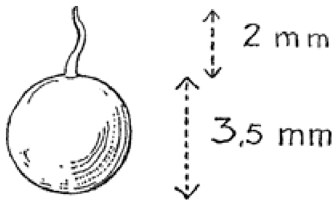


Fig. 76. Een merkwaardige vorm van ijskorreltjes.

waarbij de korrels volkomen onregelmatig, hoekig zijn, hoewel nog altijd doorzichtig.[4] Een ander maal waren ze *hol*, en droegen bovenaan een ijsdraadje als aanhangsel; de wanddikte bedroeg 0,5 mm (fig. 76).[5] In nog een ander geval droegen ze uitstralende puntige ijsnaalden[6], of waren bedekt met een sierlijk netwerk van veelhoeken[7]. Ze vallen knetterend op de grond, springen veerkrachtig op, en rollen van de hellende vlakken af; ze maken vooral een sterk geluid als ze in de herfst op de dorre bladeren vallen.

IJskorrels vallen in buitjes van korte duur, dikwijls afgewisseld door regen of sneeuw of losse hagel, meestal in het winterhalfjaar. Waarschijnlijk komen ze meer voor dan we denken, maar er wordt te weinig op gelet, terwijl hun wisselende vormen nochtans aandacht verdienen.

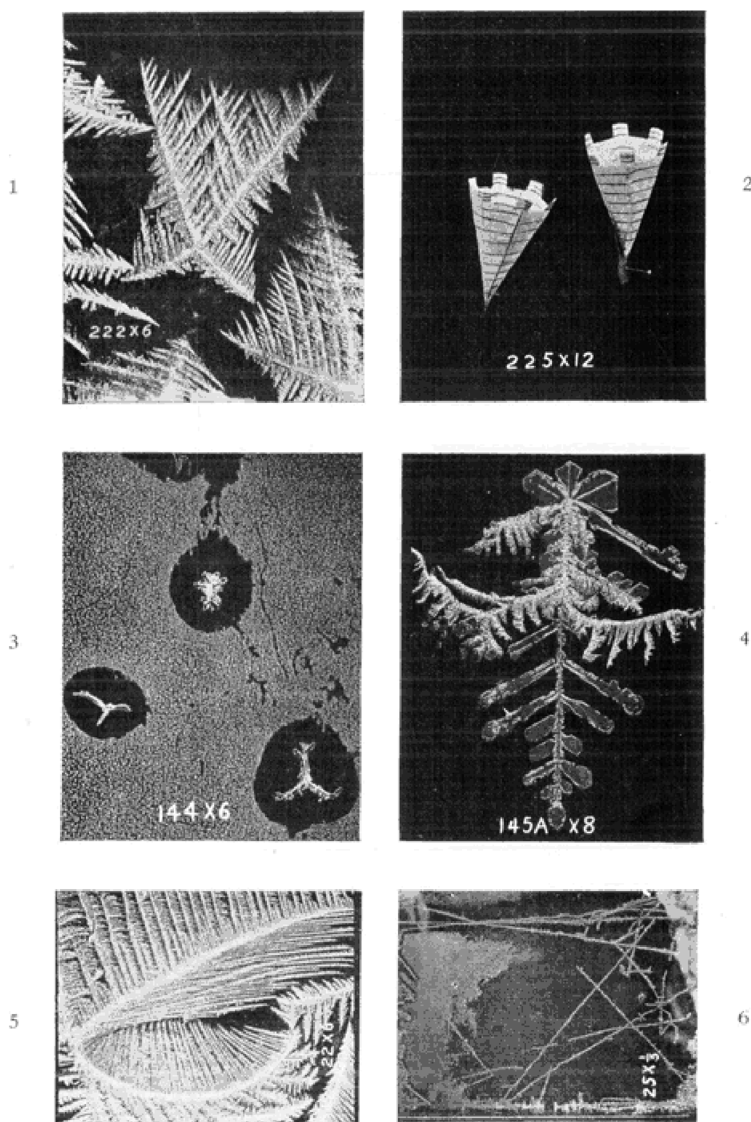
Het zijn tenslotte niets anders dan regendruppels, die door een koude luchtlaag vielen en die bevroren zijn. Misschien staat uw thermometer op dit ogenblik wel boven nul graad, maar dan bevindt zich de koude laag op een zekere hoogte, en we moeten aannemen dat de gevormde ijskorrels daarna niet veel gesmolten zijn toen ze door de onderste warme laag drongen.

1) Nat. **43**, 318, 1891.
2) Trans. Acad. St. Louis, **10**, 143, 1900.
3) K. Stoye, Met. Zs. **53**, 395, 1936.
4) Hellman, Sitzungsber. Akad. Berlin blz. 1048, 1912.
5) Ciel et Terre, **15**, 593, 1895.
6) Pinkhof, Hemel en Dampkring, **22**, 54, 1924.
7) Zs. f. angew. Met. **51**, 178, 1934.

172. Bevroren druppels.

Geheel anders is het verschijnsel dat kan optreden, als na een zware mist plotseling de temperatuur snel daalt: de waterdruppels die aan elke tak, aan elk blaadje hingen, bevriezen, en als de wind de struiken schudt, vallen ze als ijspareltjes op de grond.

Evenzo kunnen dauwdruppels, die 's avonds gevormd zijn, door sterke nachtelijke afkoeling bevriezen tot ijsbolletjes; dit komt soms in de herfst voor.



PLAAT XI. Vensterrijp.
1. Boomvorm. - 2. Model van holle trechtertjes (geen echte *venster*rijpvorm). - 3. Boomvormige kristallen, omgeven door korrelig neerslag; let op de open ruimten. - 4. Stervorm met een boomvormig festoen. 5. Boomvorm. - 6. Lijnvorm, links het korrelige neerslag.
Naar W.A. Bentley, M.W.R. **35**, 348, 1907.

Het wonderbare ijs.

Voor alle vormen van het ijs, raadpleeg het standaardwerk van A. Dobrowolski: Historja naturalna Lodu (Warschau, 1922): 880 bladzijden! De tekst is in het Pools; de zeer volledige litteratuurlijsten bij elk hoofdstuk zijn echter voor ieder toegankelijk.

173. IJspegels.

Let eens op wanneer en waar zich ijspegels vormen, de mooie ijspegels uit de sprookjes, die ons zo onweerstaanbaar in de echte winterstemming brengen! Ze ontstaan, als sneeuw in de

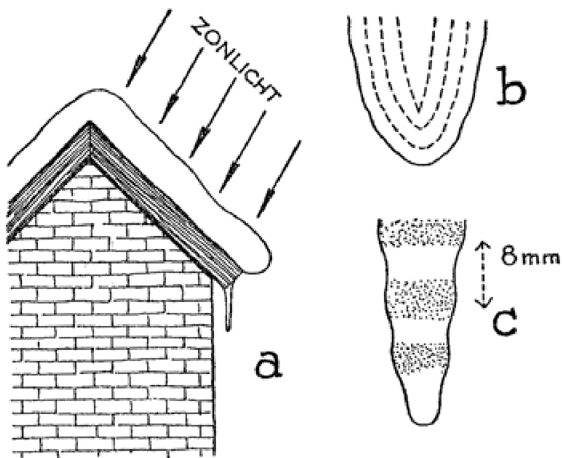


Fig. 77. IJspegels aan de rand van het besneeuwde dak.

zon ligt, terwijl de luchttemperatuur toch laag is; dan wordt hij langzamerhand warm door het opslorpen van straling, begint te smelten; het smeltwater dat wordt afgevoerd naar delen van het dak die in de schaduw liggen en waar er geen goot is, bevriest daar weer naarmate het aangevoerd wordt, tengevolge van de lage temperatuur van de lucht: er vormt zich een ijspegel (fig. 77*a*).

Laten we hem eens nauwkeuriger bekijken. Er is eigenlijk

alle reden om zich te verbazen over de spitse, bijna naaldscherpe punt waarin veel pegels eindigen; men zou denken dat ze althans even stomp moesten zijn als de waterdruppel die er onder hing toen ze bevroren. De oorzaak die de pegels scherp maakt is *de verdamping*[1]; als men aanneemt dat er op elk punt ongeveer evenveel ijs per sekunde verdampt, ziet men het effekt ineens uit een eenvoudig tekeningetje (fig. 77*b*).

Als de vorst lang geduurd heeft, vertoont de ijspegel dikwijls een periodieke struktuur (fig. 77*c*): telkens om de 8 mm ongeveer is er een lichte insnoering; en waar de pegel dan weer dikker is, zit hij vol luchtbelletjes en korreltjes aarde. Als we met een zakmes twee vlakke kanten aan de pegel schrapen en die nog met de vingers glad maken, kunnen we prachtig die inwendige bouw zien, het mooist tegen een donkere achtergrond. Deze insnoeringen komen waarschijnlijk ieder met één dag overeen: 's middags is het smeltwater overvloediger, de aangroei sneller en de luchtbelletjes hebben niet de tijd te ontsnappen: ze worden ingesloten (vgl. § 180). 's Avonds en 's ochtends gaat het langzamer en is het ijs doorzichtiger. - Om echter deze onderstelling te bevestigen zouden geregelde waarnemingen en metingen aan enkele bepaalde pegels nodig zijn.

Met een polarisatietoestel vindt men dat de assen der ijskristallen in ijspegels loodrecht staan op de cylindermantel, die het afkoelingsoppervlak vormt. Ook bij de ijskorst op vijvers staan de kristallen loodrecht op het afkoelingsoppervlak, in dit geval het horizontale ijsoppervlak (vgl. § 180).

Fotografeer ijspegels op anti-haloplaat tegen een donkere achtergrond (openstaande schuur, enz.).

174. Vensterrijp (Plaat XI)[2].

Wist u dat het ijs op onze ruiten op twee geheel verschillende manieren ontstaan kan? Als de waterdamp in de kamer tegen de koude ruit neerslaat, en daarop *eerst een dun waterlaagje* vormt, dat daarna door bevriezen in ijs overgaat, spreken we van *vensterijs*; dit zal b.v. ontstaan wanneer in de dag de temperatuur van de ruit boven 0° is, 's nachts er onder. Als echter de waterdamp *rechtstreeks als rijp* op de ruiten condenseert, zonder eerst vloeibaar te worden, gebruiken we het woord *vensterrijp*.

Vensterrijp vormt zich, als de lucht in onze kamer rustig is

1) Physica, **3**, 128, 1923.
2) W.A. Bentley, M.W.R. **35**, 399, 1907.

en niet al te vochtig, als de temperatuur buiten tenminste enige graden onder nul is, en tenminste 3° lager dan de temperatuur in de kamer. De mooiste vormen ontstaan in onverwarmde kamers met temperaturen beneden 2°; men zoeke achtereenvolgens in verschillende vertrekken, die het een iets warmer, het ander iets kouder, het derde weer wat vochtiger zijn.

Ziehier enkele der meest kenmerkende vormen; de onderscheiding der verschillende typen is natuurlijk vrij willekeurig en niet scherp.

1. Lijnvormig. - Deze figuren vormen zich vooral in verwarmde kamers en wel langs mikroskopisch fijne krasjes in het glas. Inderdaad blijkt dat zij altijd op dezelfde plaats van de ruit terugkeren: als men met een carborundumkristalletje lijntjes trekt op de ruit, zal de rijp 's anderendaags onze tekeningen getrouw weergeven. Met het vergrootglas ziet men hoe een ijsdraadje in de kras ingebed ligt, en hoe franjes aan beide kanten daarvan gevormd zijn uit korte naaldjes die loodrecht op de hoofddraad uitschieten.
2. Boomvormig. - Zeer sierlijke, vormenrijke, snelgroeiende soort, bij allerlei temperaturen voorkomend maar vooral onder 0°. Meestal bestaan de kristallen uit enige takken met zijstralen; als de ruiten niet plaatselijk verschillend van dikte waren en met onregelmatigheden en stof bezaaid, zouden deze vormen zich wel tot een zesstralige ster ontwikkelen.
3. Draderig. - Alleen in onverwarmde, niet te vochtige kamers.
4. Slingerend. - Bij zeer koud weer, de kamertemperatuur liefst beneden - 10°. De zijstralen staan dikwijls bijna loodrecht van het glas af.
5. Stervormig. - In vochtige kamers beneden - 7°, bij bestendig vriezend weer. Zij vormen zich om kleine korreltjes ijs, en staan dikwijls een weinig van het glas af.
6. Plaatvormig. - Bij nog kouder weer dan de vorige; ze gelijken wel op de zeshoekige plaatjes sneeuw, maar zijn veel minder symmetrisch.
7. Zuilvormig. - Alleen bij zeer koud weer, kamertemperatuur beneden - 10°, buitentemperatuur beneden - 22°. De holten aan de uiteinden en de figuren in deze kristallen gelijken sterk op die van zuilvormige sneeuwkristallen.
8. Open vormen. - In onverwarmde, nogal vochtige kamers; de hoofdstralen tekenen onregelmatig gebroken lijnen, de zijstralen vormen er hoeken mee van ongeveer 60°.

9. Tandvormig. - Alleen in zeer koude kamers.
10. Vezelig. - In vochtige, onverwarmde kamers waar een temperatuur van - 1° tot - 10° heerst.
11. Korrelig. - In verwarmde, vochtige kamers; vormt zich snel en komt zeer algemeen voor. Het is eigenlijk geen rijp, maar een dauw van ontelbare kleine *water*druppeltjes, die tot ijs stollen; eerst zijn ze 0,1 tot 0,3 mm groot, weldra groeien ze, tot de ruit met een aaneengesloten ijslaagje bedekt is.

Bij lichte vorst houden we een lamp of een brandende kaars dicht bij een bevroren ruit, tot er een groot stuk ruit eerst ontdooid en daarna zelfs geheel opgedroogd is. Nu nemen we de lamp weg. In de gordel gesmolten ijs om de droge plek groeien nu weldra vensterijskristallen. Dan verschijnen echte kleine vensterrijpkristallen, lijnvormig of boomvormig, in de randgedeelten van de droge vlek; en daar omheen slaat als dauw de korrelige vorm neer. Iets verder vormt zich weer vensterrijp ook opnieuw omringd door de korrelvorm. (Plaat XI, 4). Merkwaardigerwijze blijven deze waterdruppeltjes altijd op een zekere afstand van de echte vensterrijpkristallen; het is alsof deze het aanslag afstootten' tot op wel 1 mm afstand. Dit is een zeer merkwaardig verschijnsel, dat ook bij andere kristalliserende stoffen opgemerkt is.

Het is duidelijk dat de druppeltjes een grotere dampspanning hebben en voortdurend overdestilleren naar de naburige ijskristalletjes; daat slaat de waterdamp op neer, en zo is er om de groeiende rijp een zoom, waarin het gehalte aan waterdamp een snel verval vertoont (vgl. § 152). De grotere dampspanning van zeer kleine korreltjes met sterk gekromd oppervlak is een welbekend feit; het verschil zou nog sterker zijn, indien de korreltjes misschien uit onderkoeld *water* bestonden, dat bij een gegeven temperatuur een grotere dampdruk heeft dan ijs.

Om foto's van vensterrijp te maken met een gewone camera, zet men vóór het objektief een loupe, die bijvoorbeeld een 6 maal kleiner brandpuntsafstand heeft dan het objektief. U moet dan de camera tot 2 of 3 cm van de berijpte ruit schuiven, en ziet de ongeveer 6 maal vergrote beelden op het matglas verschijnen. Zorgvuldig instellen! - Mooier worden de beelden natuurlijk met een atelier-camera die heel lang uitschuiven kan, 1 meter b.v., en een achromatisch objectief van 15 cm brandpuntsafstand. Men fotografeert binnenshuis, met een zwarte achtergrond achter de ruit.

175. Vensterijs (Plaat XII)[1].

De wondermooie varens en bladeren en veren die ons elke winter verrukken door hun eindeloze verscheidenheid van sierlijke rondingen, zijn *de gevederde vorm* van vensterijs. Meestal vindt men er een hoofdstraal in, van dewelke onder hoeken van 60° talloze evenwijdige nevenstralen ontstaan; hoofdstraal en nevenstralen groeien dan verder in zachte buigingen, beginnend van de koudste delen van de ruit en telkens de daarna koudste delen zoekende. De groeirichting wordt beïnvloed door het temperatuurverloop en de dikte van het waterlaagje, ook schijnen de kristallen elkaar te vermijden. Het waterlaagje is zo dik, dat eigenaardigheden in het glas (krasjes, korreltjes) geen invloed hebben op de groei der ijsveren, en dat deze na elk ontdooien weer in geheel nieuwe vormenrijkdom verschijnen. Als de lage temperatuur aanhoudt, worden de vedervormen soms zeer dik en bedekken zich met een korrelig aanslag, of zelfs met rijpachtige plaatjes en zuiltjes.

Wie gewoon is aan de strakke vormen der gekristalliseerde delfstoffen verwondert zich allicht over de gebogen lijnen; bedenk echter dat elk der afzonderlijke ijskristalletjes, waaruit de veder is opgebouwd, heel klein is en zonder twijfel recht; in hun samenvoeging is er speling en zullen er allerlei overgangen zijn van de volkomen ordeloosheid tot de volmaakte regelmaat, waarbij alle kristalletjes zich tot één enkel groot kristalgeheel hebben verenigd. De bekoring van de vensterijsvormen berust juist op de geheimzinnige neiging tot parallelstelling der kristalletjes, die men overal voelt, en die toch nergens geheel overheerst.

Een tweede vorm van vensterijs is *de struikvorm*, veel minder in het oog vallend, maar niet minder sierlijk. Deze kristallen groeien veel langzamer.

Het fotograferen van vensterijs kan dikwijls met een gewone camera geschieden; al komt men zo dicht mogelijk bij de ruit, toch is het beeld dan nog veel kleiner dan het objekt. Zwarte achtergrond.

176. IJsarborescenties op de straatstenen[2] (fig. 78).

Als de straatstenen een weinig nat zijn geworden van de regen, en er komt vorst en wind, kan men soms mooie arbores-

1) Bentley, M.W.R. **35**, 440, 1907.
2) Nat. **47**, verschillende stukken.

centies zien ontstaan op de vlakke plavuizen en op de asfaltwegen. Het verschijnsel komt vooral voor wanneer de stenen een weinig modderig zijn; in een bepaald geval was het alleen te zien in de straten die evenwijdig aan de windrichting liepen. Soms lukt het, door een blad papier op de ijsfiguren te leggen en zacht met een tampon te drukken, een goede copie van de arborescenties te verkrijgen.

In een door mij waargenomen geval waren de figuren 5 tot 15 cm groot, en bestonden uit ijsbandjes van 2 tot 5 mm breed, een weinig overlangs gestreept,

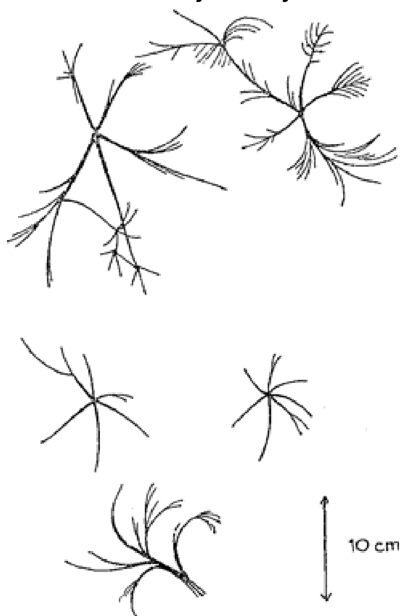


Fig. 78. IJsarborescenties op het oppervlak van de weg (nauwkeurig nagetekend).

die zich ongeveer 1 mm boven het wegdek verhieven. Dit ijs was donker gekleurd (door verontreinigingen), en tekende zich daardoor af op de lichtere omgeving. Op sommige plaatsen zag men duidelijk 6-armige sterren, zij het ook vrij onregelmatig vervormd; op een paar van de takken hadden zich nieuwe knooppunten gevormd, waarvan weer andere stralen uitgingen. Elders was de zesstraligheid niet meer te herkennen, en bogen de vertakkingen sierlijk om. Weer elders maakte het de indruk, alsof de grond verdeeld was in veelhoekige cellen, meestal 6-hoekig; de inhoud van ieder celletje was donkerder dan de lichte afgrenzingen, en in die donkere vlek had zich de arborescentie gevormd.

Het was duidelijk dat de arborescentie alle vochtigheid naar zich toe trok; ook volgens andere berichten blijkt dat de grond tussen de arborescenties vrijwel vrij van vochtigheid was. In andere gevallen viel het mij op dat de vormen verschillend waren al naar de aard van het wegdek, maar steeds even verrukkelijk rank.

Het is duidelijk dat de wind bij dit verschijnsel een belangrijke

rol speelt; veel minder begrijpelijk is de hem toegeschreven invloed bij de vorming van vensterijs, aangezien dit aan de binnenkant der ruiten ontstaat.

177. IJszuiltjes.[1)]

Merkwaardige ijsvormingen van enkele cm grootte, die zich vlak onder het oppervlak van de grond vormen en de aarde een weinig oplichten. Een regenperiode, gevolgd door zonnige dagen en rustige, heldere nachten, waarin de afkoeling door straling geschiedt, zijn het gunstigst voor deze ijsvorming. Meestal ontstaat ze slechts zeer plaatselijk, dikwijls op hellingen die naar het Noorden gericht zijn, in wagensporen of op plaatsen waar het water niet goed kan weglopen, op poreuze grond die niet begroeid is, maar met wat stof, vuil en keitjes bedekt is; ik heb ze op zandgrond bij Bilthoven eenmaal waargenomen. De ijsvormingen zijn moeilijk te herkennen; men bemerkt alleen dat de aarde er sponsachtig, bloemkoolachtig uitziet, en moet het laagje aarde verwijderen om de ijslaag te bemerken. Deze bestaat uit vertikale vezels, alle evenwijdig aan elkaar gericht op de wijze van de vezels in asbest. De individuele vezels zijn slechts 0,4 mm dik bijvoorbeeld. Gewoonlijk zijn er verschillende lagen boven elkaar, gemakkelijk van elkaar te scheiden; men heeft kunnen nagaan hoe er elke nacht een nieuwe laag bij kwam. Aan de grenslagen is het ijs wit, ondoorzichtig, terwijl het overigens doorzichtig en helder is. De grootste dergelijke vormingen die men ooit heeft waargenomen bereikten een hoogte van 20 cm. Soms steken enkele zuiltjes boven het algemeen niveau uit; in een bepaald geval scheen dit telkens het geval te zijn als er een zaadje van een composiet (Senecio?) onder lag.[2)] Andere malen staan bijna alle zuiltjes los van elkaar als pijlers, bogen, miniatuurruïnes die een allersierlijkste indruk maken (fig. 79). Of de ijszuiltjes ontstaan niet uit de aarde, maar uit afzonderlijke stukjes krijt, kalkmergel, baksteen, as, zelden op keien; ook dan bestaan ze soms uit verschillende verdiepingen (blijkbaar één voor elke dag), ze zijn tot 5 cm hoog en 8 mm dik, meest recht, gestreept, soms hol. Soms dragen ze elk een keitje op

1) Scoresby, Edinb. New Philos. Journ. **48**, 1850. - Nat, **21**, **31**, **44**, met litteratuur. - Assmann, Wetter, **6**, 7, 1889. - Quart. Journ. **54**, 18, 1928. - Een zeer uitvoerige studie in het Japans is: Goto en Inagaki, Tokyo Gakugei Zasshi, **16**, 1900. - G. Beskow, Tjälbildningen och Tjällyftningen (Stockholm 1935), met uitvoerige skandinaafse litteratuur.
2) M.W.R. **36**, 98, 1908.

hun top. Eenmaal zag men ze als lange draden opschieten uit schijnbaar zeer vast cement.[1)]

Wat is de vormingswijze dezer eigenaardige objekten? Er kan geen twijfel aan zijn dat ze ontstaan door een voortdurend

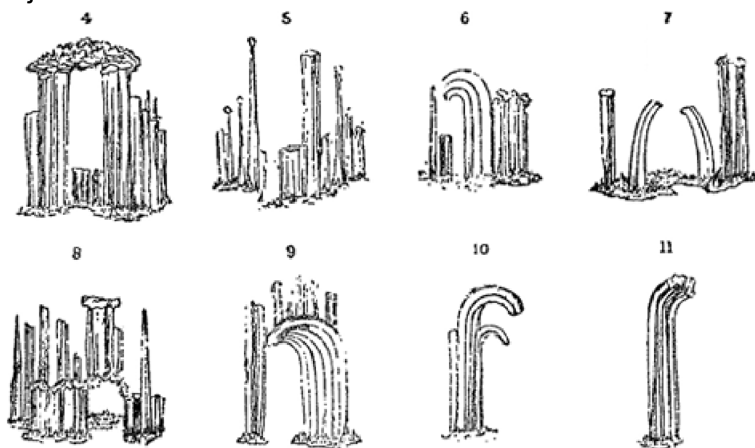
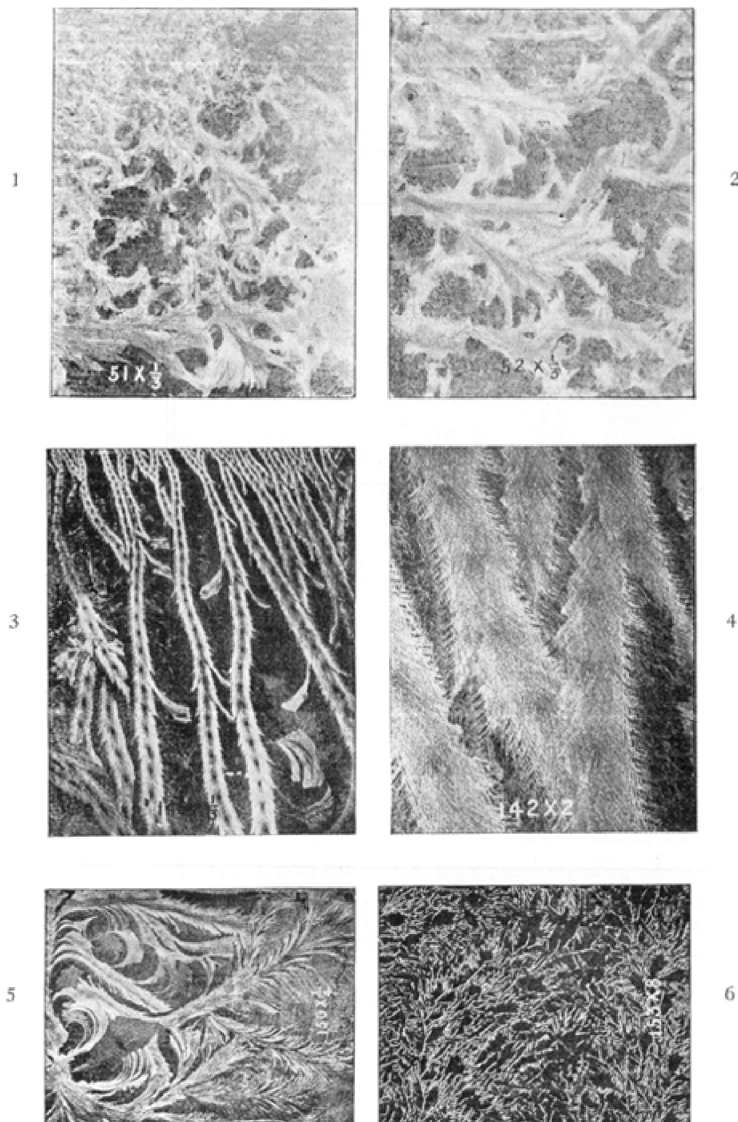


Fig. 79. IJszuiltjes, gevormd op een grintweg. Bij **4**, **7**, **8** ziet men hoe aarde en keitjes door het ijs opgelicht zijn. Op ware grootte, naar tekeningen van Scoresby, Edinb. new Philos. Journ. **48**, 1, 1849.

bevriezen van water, dat steeds nieuw wordt toegevoerd; maar bewezen is, dat de *uitzetting* bij het bevriezen geen rol speelt in het omhoogpersen der zuiltjes. Willen de vezels zich mooi ontwikkelen, dan mag de grond zelf niet bevroren zijn, anders wordt de verdere watertoevoer daardoor tegengehouden en groeien de vezels niet meer. Dit is mogelijk, *doordat het vriespunt van water in de fijne capillaire tussenruimten van de grond tenminste* 1° *lager dan normaal ligt*, en het water daar dus vloeibaar kan blijven terwijl het aan de oppervlakte stolt. De vezelige laag is slechts zeer los met de aarde verbonden; als men ze ervan losmaakt en aandachtig waarneemt, kan men opmerken hoe de dikste ijsvezels één voor één met duidelijk zichtbare gaatjes in de grond overeenkomen. Iemand, die de ijsvezels met het polarisatiemikroskoop bekenen heeft, beweert,

1) W. Prinz, Ciel et Terre, **6**, 208, 1885.



PLAAT XII.
Vensterijs.
1, 2, 3, 4, 5. Gevederde vormen. - 6. Struikvorm.
Naar Bentley, M.W.R. **35**, 348, 1907.

dat ze niet dubbelbrekend zijn, maar isotroop.[1] Dit zou kloppen met vorige verklaring: de vezelstruktuur is *niet* ontstaan door een molekulaire gerichtheid, door een groei van kristalnaalden, maar door het mechanisch omhoogpersen van het water door de poriën der aarde; de kristalassen zelf kunnen allerlei oriënteringen hebben.

178. IJsvezels aan takken.[2]

Aan de oppervlakte van dorre boomtakken en verdroogde stengels bemerkt men soms ijsvormingen die een zeer verschillend voorkomen kunnen hebben, maar toch altijd ontstaan zijn doordat ijs uit de poriën en houtvaten van het hout naar buiten geperst is bij het bevriezen, terwijl voortdurend nieuw water werd aangevoerd.

1. Soms is het een vezelige massa die op asbestvezels gelijkt; 's middags smelt het ijs in de zon en het water schijnt weer

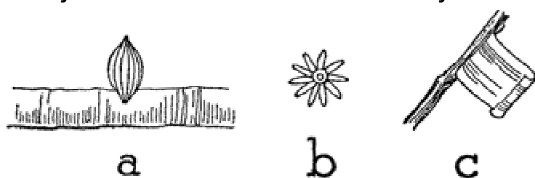


Fig. 80. IJsvormingen aan takken. *a*. halfronde schijven; bij *b* in doorsnede getekend; *c*. vlaggetje.

   in het hout te trekken, maar 's nachts vormen zich weer nieuwe vezels. Neemt men de takken mee, dan kan men het verschijnsel jaren lang demonstreren: het is voldoende de takken goed met water te drenken, de oppervlakte af te drogen, en de takken met een koudmakend mengsel te omgeven; de temperatuur mag echter niet lager zijn dan - 6°, en het bevriezen mag niet sneller gebeuren dan in 45 minuten ongeveer: anders vormen zich de ijsvezels noch in 't laboratorium, noch in de vrije natuur.[3]
2. Een andere maal waren het halfronde schijven, vastzittend aan een gemeenschappelijke as, insgelijks op dode takken voorkomend (fig. 80 *a, b*).

1) Nat. **47**, 126, 1892.
2) W. Herschel, Phil. Mag. **2**, 82, 1833. Verh. d.d. physik. Gesellschaft, 1884. - Ciel et Terre **6**, 208, 1885. - Wetter **6**, 8, 1889. - Wegener, Naturwiss. **6**, 598, 1918. - Het uitvoerigste stuk met litteratuuropgave is dat van Coblentz in M.W.R. **42**, 490, 1914.
3) Nat. **29**, 472, 1884.

3. Meestal zijn het sierlijk gekrulde, evenwijdig gestreepte ijsvlaggetjes (fig. 80 *c*), die door barsten in de schors te voorschijn komen. Men heeft dit waargenomen bij de heliotroop, de gewone distel[1], Polygonum spec., Pluchea bifrons[2], Cunila Mariana, Helianthemum canadense[3], Conyza, enz. Dit zijn allemaal planten met vele en wijde houtvaten. Van een aantal planten van dezelfde soort, die op dezelfde groeiplaats groeien, zijn er altijd slechts zeer enkele die de merkwaardige ijsvorming vertonen; er is dus niet zozeer een geheimzinnige soorteigenschap vereist, maar een bepaalde physische conditie waarin de plant moet verkeren. Meestal vindt men de ijsvlaggen aan stengels die al helemaal dood zijn of half verdord, en aan half vermolmde takken, maar in andere gevallen toch ook aan groene, nog sappige stengels. Ze komen duidelijk *uit het hout*, niet uit de schors. maar zitten er toch slechts zeer los op en laten onmiddellijk los,

Men kan gemakkelijk bewijzen dat de ijsvlaggen niets te maken hebben met rijp, doch van binnen uit ontstaan. 1. Zij vormen zich ook onder mos en bladeren. 2. Beschilder de stengel met een oplossing van asfalt in benzol: het ijs licht het zwarte laagje op. 3. Dikwijls licht de ijsvorming reepjes schors op. 4. De hoeveelheid ijs die zich aan de stengels ontwikkelt hangt niet samen met de overvloedigheid van de rijp. 5. De gevormde hoeveelheid is veel te groot om ze als rijp te kunnen beschouwen.

Ook kan men laten zien dat het ijs niet ontstaat uit bevroren sap van de planten, maar uit gewoon water dat capillair opgestegen is. 1. Het ijs heeft geen smaak. 2. Een stuk stengel, te voren bevochtigd, in een glas water dompelend en in de koude lucht geplaatst (b.v. bij - 4°), ontwikkelt langzamerhand ijsdraadjes, dan een ijsvlaggetje; er hoeven geen wortels aan de stengel te zitten, hij kan zelfs al geruime tijd verdroogd zijn.

De vlaggetjes ontstaan altijd aan dezelfde zijde van de stengel, n.l. daar waar de houtvaten het dichtst bij het oppervlak liggen. Er is dus geen twijfel aan dat het water langs deze vaten naar de vlaggetjes wordt gevoerd; hun vezelige bouw is dan ook direkt begrijpelijk. Het krullen is eenvoudig te verklaren doordat de ene zijde allicht iets sneller groeit dan de andere.

Voor de vorming is een temperatuur in de buurt van het vriespunt gunstig, gepaard aan heldere nachten met sterke

1) Phil. Mag. **2**, 82, 1833.
2) Nat. **25**, 78, 1881.
3) Nat. **48**, 214, 1893.

uitstraling; soms was de dooi al overal begonnen wanneer er nog een tak met ijsvezels gevonden werd. Het water kan blijkbaar aan de oppervlakte door straling en door verdamping tot bevriezen komen, terwijl er in de stengel nog water is, dat voortdurend blijft toevloeien naarmate de bovenlaag bevriest. De gehele vormingswijze vertoont een nauwe gelijkenis met die der ijszuiltjes (§ 177), er is m.i. geen twijfel aan dat men beide verschijnselen als een geheel moet bestuderen.

Wegener (t.a. pl.) heeft opgemerkt dat na het smelten van de door hem gevonden ijsvezels een fijn meeldauw-achtig waas op het oppervlak van de tak overbleef: het bleken zwamdraden te zijn van een kleine ascomyceet, een soort schimmel, die de gehele tak doordrongen. Hij oppert de veronderstelling dat deze zwam een aktieve rol speelt bij de vorming der ijsvezels. Hoewel deze theorie zeer onwaarschijnlijk lijkt, is het zaak alles op te merken wat hierop licht kan werpen.

179. De eerste stadia der ijsvorming (Plaat XIII)[1)].

Het is wel merkwaardig hoe we honderden malen in ons leven opmerken dat water in ijs veranderd is, terwijl de meesten onzer het bevriezen nooit voor hun ogen hebben zien gebeuren!

Op een koude wintermorgen plaatsen we een kom water buiten, vlak bij ons raam, en daarin een spiegel waarin we het licht van de hemel teruggekaatst zien. Nu kunnen we van uit onze gezellig-warme kamer het wondermooie verschijnsel volgen tegen een achtergrond van stralend licht. Als we ook een thermometer in het water hebben gezet, weten we bovendien precies wanneer we moeten beginnen op te letten.

Het bevriezingsproces geschiedt aldus. - Eerst vormen zich op het oppervlak een aantal afzonderlijke sterretjes en naaldjes. Ze groeien, sluiten zich aaneen tot een samenhangend laagje dat langzaam dikker wordt. Van dit laagje schieten kristallen naar beneden. Tevens vormen zich daaronder andere kristalletjes in het vrije water, die door hun kleiner soortelijk gewicht naar boven komen, en samengroeien met de kristallen der oppervlaktelaag.

Het is ons om *het eerste stadium* van dit proces te doen. Verrassend is de verscheidenheid van grote en kleine kristalvormen die we op het oppervlak zien verschijnen. (Plaat XIII, 3).

Naaldjes vormen zich meestal het eerst, dikwijls van de randen van de kom uitschietend, en zich verbredend tot lobben en vertakkingen.

1) Bentley, M.W.R. **35**, 442, 1907.

Schijfjes ontstaan als uiterst dunne, zuiver ronde ijsplaatjes van allerlei grootte, dikwijls groeien ze uit tot lobben en stralen en gaan over in zesstralige ijsbloemen.

Zeshoekjes maken een dergelijke ontwikkeling door als de schijfjes, maar zijn van 't begin af zeskant.

Bloempjes beginnen met een klein zeshoekig sterretje, en vertakken en versieren zich dan meer en meer.

Boogvormen, recht aan één kant, gebogen aan de andere zijn zeer kenmerkend voor het bevriezingsproces.

Koraalvormen, gaan van een naald of schijfje uit, en vertakken zich grillig over het oppervlak.

Al deze vormen hebben zachte, afgeronde omtrekken, veel minder scherp dan de sneeuwkristallen. Ze verschijnen grillig door elkaar, zonder dat iemand zeggen kan waarom zich hier het ene, daar het andere ontwikkelt. Hun vlakken zijn evenwijdig aan het wateroppervlak, hun as loodrecht erop; als ze gevormd worden zijn ze misschien 0,1 mm dik en 0,5 tot 5 mm groot. Gebruik dus de loupe! Hoe kouder het buiten is, hoe kleiner de kiemen zijn.

Door voorzichtig de omringende kristallen weg te scheppen, kan men de vrije ontwikkeling van bepaalde interessante typen bevorderen. Tik tegen de kom of schud: er vormen zich honderden nieuwe kleine kiemen.

Het is ook leuk om twee gelijke kommen water naast elkaar te stellen; als ze naaldjes beginnen te vormen laat men de eerste rustig staan in een windstil hoekje, en roert voortdurend in de tweede. De eerste bevriest min of meer over zijn gehele oppervlak tegelijk, de tweede begint aan de randen van het vat te bevriezen, waar de ijsnaaldjes zich kunnen vasthechten.[1)]

180. IJsvorming op stilstaand water.

Als het gaat vriezen koelt het water geleidelijk af, en wel het eerst aan het oppervlak; dat koudere water is het zwaarste en zakt naar beneden. Is echter eenmaal een temperatuur van 4° bereikt, dan gaat dit niet meer door, aangezien water beneden 4° weer *lichter* wordt en bovendrijft. Tenslotte is dus het water in de diepte tot ongeveer 4°, aan het oppervlak tot 0° afgekoeld.

Nu ontstaat ijsbedekking, doordat ijsnaalden van de oever uitschieten, geleidelijk naar het midden toe groeien en een samenhangende laag vormen. Het is de moeite waard er zich

1) La Nat. **19**, 113, 1891.

rekenschap van te geven, waarom het ijs zich vroeger vormt op de ene plaats dan op de andere. In een rivier verschijnt het later dan in een sloot, omdat in het eerste geval veel meer water af te koelen is, en de stroming voortdurend de verschillende lagen dooreenmengt. Onder een brug komt het later en blijft het dunner: vooreerst is daar een sterkere stroming tengevolge van de vernauwing, en daarenboven is de uitstraling er geringer en de verdamping langzamer. De twee laatste faktoren zijn

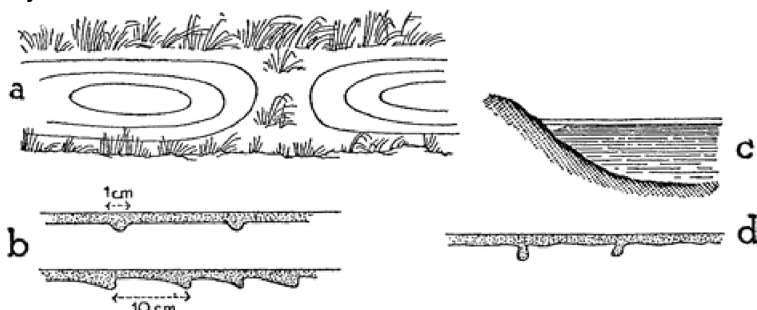


Fig. 81. IJsvorming op een sloot. *a*. heldere en donkere lijnen in het ijsdek; *b, d*, doorsnede daarvan; *c*. vormingswijze.

het ook die verklaren waarom dikwijls een sloot geheel met ijs bedekt is, uitgezonderd daar waar hij onder de dichte takken van enige struiken verborgen is.

Meestal is het ijs nabij de oevers witter, in het midden daarentegen donkerder en doorzichtiger. Men ziet duidelijke lijnen, die aangeven tot waar het water op een gegeven ogenblik bevroren was, en hoe de ijsvorming dan verder is voortgeschreden; waar er bosjes waterplanten staan krommen de ijslijnen, alsof die waterplanten bij de oevers behoorden (fig. 81*a*). Komt iedere gordel met een etmaal overeen (sterkere vorst 's nachts, verandering van het waterpeil)? De verschillende helderheid van de gordels kan op twee manieren ontstaan: 1. In het water is er altijd lucht opgelost, die bij de ijsvorming vrijkomt; als zich het ijs langzaam vormt, worden de belletjes weggedrukt en het ijs ziet er doorzichtig uit; als het ijs snel bevriest worden de belletjes ingesloten en het ijs ziet er wit uit, omdat veel lichtstralen tegen die belletjes teruggekaatst worden.[1)] 2. We halen

1) Vgl. § 173. Is deze invloed van de bevriezingssnelheid wel eens proefondervindelijk en in bijzonderheden onderzocht?

een stuk ijs uit de sloot en bekijken de onderkant: *wat* we als een lijn zagen blijkt overeen te komen met een verdikte lijst die in het water hangt (fig. 81*b*). Nabij de oevers zit er dikwijls lucht onder het ijs, dat dan grijswit lijkt, omdat de lichtstralen voor een aanzienlijk gedeelte terugkeren; in het midden echter en bij de verdikte lijsten raakt het ijs aan 't water en is het doorzichtiger. In andere gevallen zijn de dikkere lijsten juist witter door de aanwezigheid van een aantal kleine luchtbelletjes.

Zulke lijsten in het ijs ontstaan tengevolge van dalingen van het waterpeil, als er bij de oever luchtholten komen terwijl het vriezen blijft doorgaan (fig. 81*c*); de randen van het ijs worden dan niet meer dikker, terwijl de meer centrale delen nog aangroei vertonen.[1] Is deze verklaring juist, dan moeten de lijsten hun steilste zijde naar de oever keren.

Moeilijker te begrijpen is, hoe er zich ook knobbels onder aan het ijs kunnen vormen, dikwijls met spitse knikken in de lijsten overeenkomend (fig. 81*d*). Meestal loopt er boven zulk een knobbel een breukvlak evenwijdig aan de oever.[2]

181. Luchtbellen in het ijs.

Bijna altijd ziet men aan bevroren sloten of singels hoe een aantal luchtbellen in het ijs ingesloten zijn. Meestal zijn er telkens verscheidene *nauwkeurig boven elkaar* in vertikale rijtjes. Men kan onderstellen dat de lucht afkomstig is van enkele zeer bepaalde punten van de bodem, waar de bellen geregeld, de ene na de andere, opstijgen; het lijkt echter uiterst onwaarschijnlijk dat ze dan zo nauwkeurig onder elkaar komen te liggen. Het schijnt veeleer dat bij het groeien van een ijslaag voortdurend de in het water opgeloste lucht vrijkomt, en dat er bepaalde punten zijn waar dit gemakkelijker gebeurt dan elders, zodat de reeksen luchtbelletjes de richting aangeven waarin het bevriezen voortgeschreden is (Vgl. nog § 184).

Op een keer dat er plotseling felle vorst was ingevallen, zag men de Oude Gracht te Utrecht met ijs bedekt, en kon men overal opmerken hoe de luchtbellen rijen vormden *in de stroomrichting*; zulk een rij bellen was wel een meter lang, de bellen maten enkele mm tot 5 cm[3].

Om deze raadselachtige verschijnselen beter te begrijpen, zouden we gaarne weten waaruit de bellen bestaan. Is het moeras-

1) Nat. **89**, 34, 1912; **105**, 741, 1920.
2) Nat. **88**, 414 en 492, 1912; **94**, 563, 1915.
3) Een dergelijke waarneming in Nat. **100**, 404, 1918.

gas (methaan, CH_4), dat zich uit de bodem ontwikkelt? Of is het lucht die in het bevriezende water opgelost was en er uitgedreven werd? - Er zijn gevallen bekend waarin men het ijs met een naald heeft doorgeprikt op de plaats van een grote bel, en dan het ontsnappende gas kon aansteken: er was dan geen twijfel meer, het was moerasgas. Ik geloof echter dat in veel andere gevallen de bellen uit lucht bestaan, en denk daarbij aan de talloze luchtbelletjes die in kunstijs zijn opgesloten.

182. De bouw van een dikke ijslaag.[1)]

We hakken een stuk ijs uit, dat zich op stilstaand water gevormd heeft, en maken er een mooie dwarse doorsnede van die we met een mes en daarna met de vinger glad polijsten. Het ijs blijkt te bestaan uit verschillende lagen evenwijdig aan het oppervlak, sommige helder doorzichtig, andere melkwit; de witte lagen liggen vooral in de bovenste helft.

Aan oud ijs kan men bij goede belichting waarnemen, dat de doorzichtige lagen uit een soort van onregelmatige cellen opgebouwd zijn, de celwanden merendeels loodrecht op het oppervlak staande. De witte lagen zijn gekenmerkt door duizenden luchtbelletjes of liever luchtcylindertjes, alle loodrecht op het oppervlak gericht; in de ene laag zijn deze luchtholtetjes meer bolrond, in de andere meer langgerekt. Dit is lucht die eerst in het water opgelost was, en er door het bevriezen uitgedreven is. Hoe sneller het bevriezen, hoe meer luchtbuisjes: vandaar dat het ijs van de vijvers er meer bevat dan dat van snel stromend water. Bentley onderstelt, dat de onregelmatige uitzetting of samentrekking van het ijs de lucht perst in spleten en breukvlakjes, waarvan de weerstand het geringst is, en waarvan we weten dat ze dikwijls loodrecht op het oppervlak staan. Toch lijkt die verklaring onbevredigend: bekijkt men de cylindertjes met het vergrootglas, dan ziet men hoe verscheidene daarvan in elkanders verlenging liggen en blijkbaar samenhoren; men kan de omtrek van het oorspronkelijke kanaal nog zwakjes onderscheiden. Het zijn dus geen spleten die in het ijs voorkomen, maar lange buisjes die over hun gehele lengte even wijd blijven. In die buisjes zou de lucht zich onder druk bevinden; brengt men het stuk ijs enige tijd in het zonlicht of in de warmte, dan zouden de buisjes langer worden(?).

Persoonlijk maak ik mij het volgende beeld: als de ijslaag

1) Bentley, M.W.R. 35, 443, 1907.

nog zeer dun is, draagt ze aan haar onderkant een aantal luchtbelletjes; op die plaatsen groeit ze praktisch niet aan, daarnaast wordt ze dikker en dikker, uit de stollende lagen wordt telkens nieuwe lucht geperst die zich bij voorkeur daar verzamelt waar er al een luchtholte was; zo vormen zich luchtcylindertjes loodrecht op het oppervlak. Af en toe kruipt er capillair wat water in deze buisjes, zodat ze niet continu doorlopen, maar telkens weer onderbroken worden.

De gehele theorie van het ontstaan dezer merkwaardige vormingen schijnt nog zeer onzeker. Wat des te opvallender is, daar men ze dagelijks ziet aan ieder willekeurig blok ijs, kunstmatig of natuurlijk!

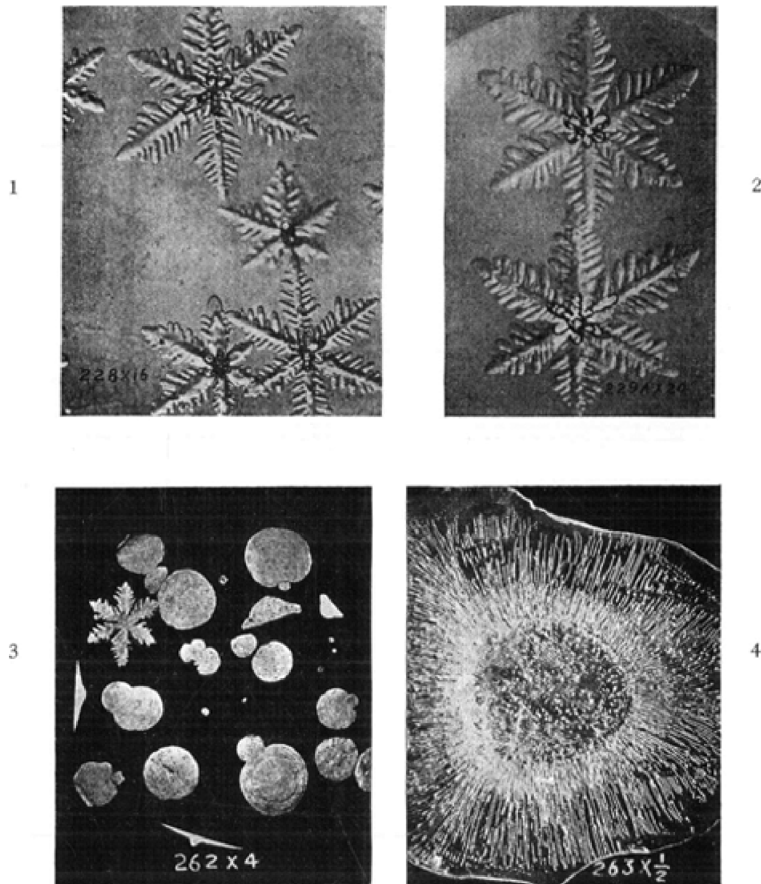
183. De ijslaag als mozaiek van kristallieten.

Neem een plaat ijs die zich op het stilstaand water van een vijver gevormd heeft, op een windstil plaatsje en zo langzaam mogelijk. Werp loodrecht op het oppervlak een kegel zonlicht met behulp van een loupe of een dubbelbol brilleglas. Het is opvallend hoe langzaam het ijs smelt in de felle stralen: eenvoudig omdat een groot gedeelte van de bundel dwars door het ijs dringt en niet opgeslorpt wordt. Maar weldra begint het smelten, in de buurt van kleine stipjes in het ijs ('luchtbelletjes'?). Ieder stipje omringt zich met een sierlijk zesstralig sterretje, dat goed te zien is als men de bestraling even onderbreekt en nu de loupe gebruikt om naar het ijsplaatje te kijken; liefst moet de achtergrond half donker, half licht zijn, zoals b.v. de dakenlijn der huizen in de verte. Sommige stukken ijs vertonen het heel mooi, andere veel minder duidelijk. In 't midden zit een belletje, blijkbaar ontstaan doordat het smeltende ijs samentrekt en als water een kleiner volume inneemt. In rustig gevormd ijs zijn alle sterretjes evenwijdig aan het wateroppervlak, en *alle stralen gelijk gericht. Dit bepaalde gebied van de ijsplaat bestaat dus eigenlijk uit een enkel, groot kristal* (Plaat XIII, 1 en 2).

Sla kort en krachtig met een hamer op ijs dat zich in rustige omstandigheden gevormd heeft: het barst dikwijls volgens een zesstralige ster: weer een bewijs dat in dit gebied het ijs één enkel kristal vormt, met één enkel stelsel splijtvlakken. In naburige punten zijn de splijtrichtingen dezelfde, maar iets verder zijn ze ineens weer anders georiënteerd. Men kan aldus

[1]

1) J. Tyndall, The Forms of Water, blz. 35 (London 1872). - H. Schoentjes, Fleurs de la Glace (Gent, 1905), met prachtige foto's.



PLAAT XIII.
De struktuur van het ijs.
1. 2. Smeltfiguren in een dikke ijslaag (§ 183). - 3. De eerste stadia der ijsvorming op bevriezend water: schijfjes, bloempjes, boogvormen. 4. Water in een ondiepe schotel, bevroren.
Naar W.A. Bentley, M.W.R. **35**, 348, 1937.

opzoeken welke gebieden samen tot eenzelfde kristal behoren. Voor ijs dat gevormd is bij windstilte en temperaturen om het vriespunt, vindt men dat het mozaiek bestaat uit elementen van ongeveer 65 cm middellijn.

In sommige gevallen kan men dit mozaiek van kristallieten rechtstreeks waarnemen. Dit gelukte mij eenmaal te Bilthoven, bij een sloot die bij volkomen windstil weer bevroren was; in de dag straalde de zon en 's nachts vroor het. Men kon zien dat het ijsoppervlak op vele plaatsen bestond uit een aantal onregelmatige 6-stralige sterren, 10 tot 20 cm groot, die in elkaar grepen, en gescheiden waren door een duidelijke bochtige lijn; er kon dus inderdaad van een *mozaiek* gesproken worden. Deze bijzonderheden waren het best te zien aan de grens der weerspiegeling van donkere en heldere voorwerpen.

Een ander dergelijk geval werd door Professor Dr. van Arkel waargenomen aan vennen te Oisterwijk. In de richting van de laagstaande zon kijkend zag men hoe de gehele ijsvlakte een moiré vertoonde en samengesteld bleek uit helderder en donkerder velden, die van 1 tot 3 m groot waren. Bij het smelten zijn er fijne ribbeltjes op het grondvlak gevormd, in een richting bepaald door de oriëntering van de kristallen, en het licht wordt sterker of zwakker teruggekaatst al naar gelang het meer loodrecht op die ribbels of meer evenwijdig eraan invalt. Het is op grote schaal hetzelfde verschijnsel dat men waarneemt aan gegoten metalen, die bij etsing door een moiré verraden hoe zij uit kristallieten zijn opgebouwd.

Waar het water minder rustig is, of in ondiepe plassen langs de weg, is er geen sprake meer van zulk een regelmatige opbouw. Dikwijls kan men daar zien hoe grote, centimeters lange ijsnaalden in allerlei richtingen door het water groeien; er is dan geen gelijke oriëntering meer, de kristallieten blijven klein en dringen op de meest verwarde wijze tussen en over elkaar.

184. Proeven met ijs.

a. Hak een stuk mooi, doorzichtig ijs uit het water, bewerk dit met het mes en met de vlakke hand tot u een mooie, gladde lens heeft verkregen van 15 cm middellijn. Hiermee kunt u beproeven zwart papier of hout in brand te steken, zoals de noordpoolreiziger Scoresby, toen hij geen ander middel meer had om vuur te maken; met zulk een lens kon hij zelfs lood smelten.

b. Goed ijs waarop men veilig schaatsen kan is altijd hard, een zakmes dringt er moeilijk in door. Als het echter gaat dooien,

nog voor het ijs gesmolten is, vindt men dat het veel zachter geworden is: beproef met het zakmes.[1)]!

c. Wanneer er zich belletjes in het ijs vertonen, of wanneer ze ontstaan zijn door bestraling met zonlicht en een lens, is er een eenvoudig middel om uit te maken of die holten gevuld zijn met lucht of luchtledig. Men brengt het stuk ijs in een glas warm water, en wacht tot het afgesmolten is tot aan de bewuste blaasjes: in 't algemeen ziet men ze dan als belletjes opstijgen, wat bewijst dat ze met lucht (of gas) gevuld waren.

d. Giet water in een inmaakglas tot een hoogte van enkele centimeters, voeg er een weinig tuinaarde bij. Laat op een koude nacht bevriezen. In het ijs heeft zich een 'ijsdistel' gevormd, bestaande uit een aantal kanaaltjes die soms een korreltje aarde aan het uiteinde dragen. Ieder kanaaltje geeft aan volgens welke baan het bevriezen vooruitging.[2)] Het gaat ook zonder tuinaarde, als men maar water uit de kraan neemt, dat goed luchthoudend is (Plaat XIII, 4). Kleur het water met een weinig kaliumpermanganaat: het ijs dat zich eerst vormt is kleurloos, het centrale kanaal dat het laatst bevriest bevat de opgeloste stof.

e. Bij het laten bevriezen van een pannetje water werd in bepaalde gevallen een schuin omhoogstekende ijspunt verkregen.[3)]! Men vermoedt dat het wateroppervlak eerst bevroren is; als dan de vorst verder doordrong, heeft de uitzetting de ijslaag doen barsten en is het water door de barst gedrongen.

f. Giet een 2% gelatine-oplossing op een glazen ruitje. Laat het overtollige afdruipen, en stel de plaat bij vriezend weer buiten. Er vormen zich ijsbloemen binnen in de gelatinelaag. Giet absolute alkohol over de plaat, zodat het ijs oplost; als de alkohol verdampt is blijven de kanalen open die eerst met ijs gevuld waren. Men heeft aldus een soort afgietsel van de ijsbloemen, dat men bewaren kan.[4)]

185. Draagkracht van ijs.

Goed ijs van 4 tot 5 cm dikte draagt een man, 9 cm een ruiter, 14 cm een wagen met vee; 15 tot 20 cm draagt veldartillerie; de zwaarste wagens en een grote mensenmenigte zijn veilig bij een dikte van 27 cm; 45 cm zou een spoortrein dragen.

De grootste dikten 'gezond ijs' die in Holland gemeten zijn

1) J. Tyndall, The Forms of Water, blz. 87 (London 1872).
2) Nat. **98**, 370 en 470, 1917.
3) Met. Mag. **64**, 44. 1929 - Nat. **127**, 340 en 603, 1931.
4) Naar H. Molisch.

schijnen niet meer dan 30 cm te bedragen. Hierbij zijn dus niet meegerekend: hopen kruiende ijsschotsen, een dikke sneeuwlaag, enz.

186. Smelten van ijs onder bladeren.

Een sloot is met ijs bedekt, en er liggen hier en daar afgevallen bladeren op; de zon schijnt. Nu merkt men op, dat ieder blad in een holtetje van het ijs gezonken is, gemiddeld 1 cm diep. Het is duidelijk dat elk blad de zonnestralen opslorpt, meer dan ijs dit doet: vgl. een dergelijke proef

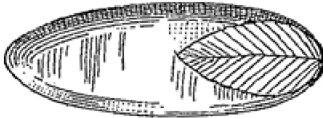


Fig. 82. Merkwaardige smeltfiguren van een ijslaag om dorre bladeren

met sneeuw (§ 161)!

Een andere maal was elk dezer uithollingen gevolgd door een minder diepe, langwerpige uitholling in het ijs (fig. 82). De gehele sloot vertoonde honderden van die inzinkingen, alle gericht in de lengterichting van de sloot, alle enkele mm diep en met water gevuld, alle met een blad of een ander vast voorwerp bij het uiteinde. Het was niet geheel duidelijk of de richting der holten bepaald was door de windrichting of door de stroming; men kan zich misschien voorstellen dat het dorre blad door de zonnestraling warm wordt, het ijs doet smelten, en dat het warmere smeltwater door de wind voortdurend naar de éne zijde gedreven wordt.

187. Smelten van ijs op de winkelruiten.

Het vriest. De ruiten der winkels zijn gelijkmatig met een dunne ijslaag bedekt, maar op bepaalde plaatsen is het ijs gesmolten in doorzichtige, ellipsvormige vlekken die merkwaardig scherp begrensd zijn. - Verklaring: bij de verwarming van de winkel behoort ook het leiden van warme lucht langs de ruiten; zij stijgt op door spleetvormige openingen aan de onderkant van de ruit. Elke smeltvlek komt nauwkeurig overeen met een verwarmingsopening onder aan het vensterkozijn.

188. Sporen van waterdruppels in het ijs.

Een miniatuurvijvertje in het bos, bevroren met een laagje ijs van ongeveer 8 mm dikte; aan de oever enkele elzeboompjes, hun takken hangen over het ijs. Er is de laatste dagen af en toe

sneeuw gevallen; nu is de lucht blauw en de zon schijnt. Temperatuur: - 1°.

Onder de boompjes hebben zich in het ijs merkwaardige sporen gevormd van ongeveer 3 cm middellijn. Het ijs, dat overal elders witachtig is en met luchtbelletjes gevuld, heeft daar een donkerder kleur en is vrij



Fig. 83. Doorsnede van een ijslaag op een plaats waar voortdurend druppels vallen.

van luchtbellen, terwijl het ijs er om heen een dikkere gordel vormt (fig. 83 geeft weer wat men ziet als men het ijs dwars door zulk een ‘krater’ breekt). Blijkbaar is de sneeuw op de boomtakken in de zon gesmolten, en zijn er van bepaalde plaatsen waterdruppels afgedropen op het zich vormende of reeds gevormde ijs. Misschien hebben zij het plaatselijk doen smelten, en is het daarna weer bevroren; of misschien hebben zij gedurende het bevriezen geregeld de luchtbelletjes weggedreven? Zeker is echter dat het opspattende water de ringwal gevormd heeft.

Onwillekeurig denkt men aan het ontstaan der maankraters, waarvan sommigen aannemen dat ze gevormd zijn door meteoorstenen, vallend in een aan de oppervlakte gestolde massa!

189. Opvriezen.[1)]

In leemgrond komt het dikwijls voor, dat steenblokken na een periode van vorst gevolgd door dooi, een eindje opgelicht zijn en zich nu hoger bevinden dan ze oorspronkelijk waren, terwijl ze ook los zijn geraakt van de hen omgevende grond. Het verschijnsel is in noordelijke landen zeer opvallend, maar ook bij ons waar te nemen; men kijke een uur na zonsopgang, direkt na het invallen van het dooiweer.

Het verschijnsel is nauw verwant aan de vorming van ijszuiltjes (§ 177).

190. IJsvorming op grote rivieren.[2)]

Het ijs vormt er zich later dan op stilstaand water: 1. verscheiden onzer rivieren voeren water aan uit zuidelijke streken, waar het warmer is; 2. de stroming roert de watermassa dooreen

1) Vgl. de verhandeling van Beskow (§ 177 aangehaald).
2) Arch. d.d. Seewarte, **44**, 1927.

en bemoeilijkt daardoor het bevriezen (§ 180). Blijft echter de vorst aanhouden, dan is op een gegeven ogenblik de temperatuur van het water vrijwel overal tegelijk tot 0° gedaald, zowel op de bodem als aan het oppervlak; de temperatuurverschillen zijn niet veel meer dan ± 0°,4.

Zodra het vriespunt bereikt is vormt zich ijs: van onderkoeling is geen sprake, zelfs bij snel invallende strenge koude daalt het rivierwater nooit meer dan enkele 0°,001 onder nul eer het bevriest. De eerste ijsnaalden[2)] ('frazil-ice') vormen zich 's nachts aan het oppervlak, waar de afkoeling door straling het grootst is; maar ze worden weldra door alle lagen heen geroerd. 's Ochtends verdwijnen ze weer. Waar de ijsnaalden drijven wordt de vorming van rimpelingen door de wind belemmerd en lijkt het water olieachtig, sommigen zeggen dat het van kleur veranderd is; troebel water wordt opvallend helder, 'doordat alle stofjes met ijskristalletjes omringd zijn'(?). De volgende avond ontstaat er al meer ijs.

De vele ijsnaalden die in het water zweven hebben de neiging overal aan te plakken. Bij elektrische centrales verstoppen ze de roosters en soms zelfs de turbines. Op ondiepe plaatsen gaan ze aan de bodem vastzitten, en vormen grijsgele stukken ijs, gemengd met rivierzand of grint: het is het beroemde *grond-ijs* (Grundeis, anchor ice, glace de fond). Soms is het water zo helder, dat men dit grondijs als struiken of zeewier op de bodem kan zien. Sommigen weten te vertellen dat het zich beter vormt op donkere delen van de bodem dan op lichtgekleurde, dat het alleen bij heldere lucht en nooit onder bruggen ontstaat: deze onvoldoende gestaafde beweringen zijn toe te schrijven aan het geloof, dat de uitstraling van de bodem dwars door het water merkbaar tot zijn afkoeling bijdraagt - welk geloof echter van elke redelijke grond ontbloot is. Het schijnt, dat een zeer kleine temperatuurverhoging van de bodem al voldoende is om het grondijs los te maken; vandaar dat 's ochtends bij zonneschijn dikwijls veel grondijs opstijgt,[1)] soms zoveel, dat telegraafkabels erdoor werden opgelicht. Het grondijs is sponsachtig en zacht, men ziet duidelijk dat het niet eigenlijk ter plaatse gevormd is.

Langzamerhand verschijnen dunne scholletjes die met de stroom meedrijven. Ze worden elke dag groter. Nu gaan ze tegen

2) J.R.A.S. Canada, **20**, 351, 1926.
1) Bij langzame stroming kunnen het ook wel ijsplaatjes zijn.

elkaar stoten, ronden elkaar af, gaan hier en daar om hun as draaien en worden aldus nog volkomener rond; door de botsing krijgen ze witte randen, waar het ijs telkens stuk gedrukt is, en de lucht in ontelbare barstjes doordringt. Dat is het zogenaamde *pannekoeken-ijs*[2)], dat algemeen voorkomt overal waar grote rivieren ijsschotsen vervoeren; de 'pannekoeken' lijken veeleer op Limburgse vlaën met een verdikte rand, en hebben middellijnen die al naar de gevallen van enkele decimeters tot enige meters kunnen bedragen.

Verscheidene schollen vriezen aaneen tot 'vellen'. Als de waterstand niet zeer hoog is, gaan die ijsplaten soms in een bocht van de rivier of tegen de pijlers van bruggen 'zitten', en er vormt zich een ijsdam, die een paar meter hoog kan worden. Het is een vreemd gezicht; de dam houdt alle schollen tegen, en stroomafwaarts is de rivier bijna ijsvrij, terwijl de waterspiegel er duidelijk lager is dan stroomopwaarts.

Merkwaardig en indrukwekkend is het loskomen van zulk een dam bij dooiweer!

> Bij gering verval verloopt het begin der ijsvorming enigszins anders: de zwevende ijsnaalden groeien van de oever naar het midden der rivier en bedekken langzamerhand het gehele oppervlak, zonder dat er zich schollen vormen.
> Op een meer werd waargenomen, dat zich telkens bij een bepaald punt ijsplaten vormden, zo dik als vensterglas, die in grote hopen schuin opwaarts gingen staan.

191. IJs op de zee.

In zeldzame strenge winters bevriest de Zuiderzee of zelfs de Noordzee langs onze kust.

Bij koude nachten kan men dan een vreemd gezoem, gedonder, gebruis, gekraak horen, als vaarde een stormwind onder het ijs. Er vormen zich lange barsten, langs waar water wordt uitgestoten. Waarschijnlijk is het samengeperste lucht onder het ijs die een uitweg zoekt.

Zeewater heeft een lager vriespunt dan zoet water, daar het veel zouten in oplossing bevat. Bij ongeveer - 2° vormt zich het eerste zee-ijs, dat rijker is aan sulfaten, terwijl het overblijvende water rijker aan chloriden wordt. Omstreeks - 8° is de oplossing verzadigd met Na_2SO_4 geworden, en scheidt zich een mengsel

2) Arch. sc. phys. nat. **25**, 352.

van dit zout met ijs af ('cryohydraat')[1]. Het zeewater dringt echter telkens weer door in de spleten van het reeds gevormde ijs, brengt en haalt er weer nieuwe zouten, zodat de samenstelling van zee-ijs zeer ingewikkeld en veranderlijk is.

Het soortelijk gewicht van zee-ijs schommelt van 0,90 tot 0,96. (Zoetwater-ijs: 0,917).

1) De afscheiding van NaCl zou eerst bij veel lagere temperaturen beginnen.

Aardmagnetisme en luchtelektriciteit.[1)]

192. Magnetisme van ijzer in het aardveld.

IJzeren voorwerpen worden zelf magnetisch in het aardveld; vooral als ze lange tijd in dezelfde stand blijven, kan dit geïnfluenceerde magnetisme sterk worden. We nemen een kompasje en gaan allerlei vast georiënteerde voorwerpen buiten onderzoeken. Het is niet voldoende waar te nemen dat ze enige invloed op de magneetnaald uitoefenen: dat doet gewoon *niet-magnetisch* ijzer ook! Nader echter tot het ijzeren voorwerp van de O.- of

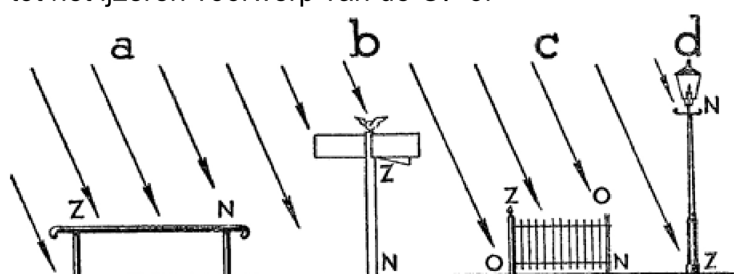


Fig. 84. In het magnetisch veld der aarde worden ijzeren en stalen voorwerpen door influentie magnetisch.

W.-zijde, en zie nu hoe de kompasnaald afwijkt, dan kunt u het eigenlijke magnetisme beoordelen.

Horizontale ijzeren staven, zoals brugleuningen, die in het Noord-Zuid-vlak geplaatst zijn, vertonen zoals we verwachten een Z-pool aan het zuidelijke eind, een N-pool aan het noordelijke (fig. 84*a*).

Vertikale staven van profielijzer of bundels van dergelijke

1) Schonland, Atmospheric Electricity (London 1932).

staven, telefoonpalen, palen voor elektrische geleidingen enz. hebben altijd een Noordpool beneden, een Zuidpool boven (die laatste echter dikwijls niet bereikbaar, fig. 84*b*). Dat klopt: het aardveld loopt schuin, en heeft niet alleen een horizontale, maar ook een sterke vertikale komponente, waardoor de onderkant der ijzeren voorwerpen N-pool moet worden. Een ijzeren hek, dat altijd in het meridiaanvlak ongeveer stond, had duidelijk zijn polen in N en Z, terwijl het bij de hoekpunten O weinig of niet magnetisch was (fig. 84*c*). Een enkele maal vindt men aan de bovenkant van een klein paaltje Zuid-magnetisme, beneden geen duidelijk magnetisme: blijkbaar zit er nog een groot stuk van het paaltje onder de grond, en is dit juist het uiteinde met Noord-magnetisme.

Daarentegen zijn de gietijzeren lantarenpalen en wegwijzers precies omgekeerd van polariteit!! Zonder uitzondering zijn ze boven Z, onder N (fig. 84*d*). En dit in alle steden waar ik het beproefd heb. Verklaring: gietijzer is veel minder week dan gesmeed of geplet ijzer, het behoudt het magnetisme dat het bij zijn vorming gekregen heeft. Bij het gieten hebben blijkbaar al die lantarenpalen onderste boven gestaan, hetgeen ook inderdaad technisch het eenvoudigste is; aan hun magnetisme is sedertdien niets meer veranderd.

193. Scheepsmagnetisme.

Zeer bijzondere storingen ondergaat het kompas op een ijzeren schip. Om daar een denkbeeld van te krijgen moeten we trachten de toelating te bekomen tot waarnemen aan boord, of gebruik maken van de gelegenheid als we eens een reisje per stoomschip maken. Reeds op een gewone ijzeren lichter kunnen de voornaamste verschijnselen waargenomen worden.

Vóór we aan boord gaan, op een afstand van tenminste 3 of 4 maal de lengte van het schip, en ver van ijzeren hekken enz., bepalen we de richting van een duidelijk zichtbare verre toren of van de zon (een lucifer vertikaal houden, dat zijn schaduw op het middelpunt van het kompas valt). Gaan we nu aan boord, dan bemerken we dat de magneetnaald geheel en al mis wijst; we houden hierbij het kompas b.v. een 50-tal cm boven het dek. Al naar gelang van de plaats waar we de proef nemen is de afwijking een andere, dikwijls bedraagt ze 90° en meer! Binnen in het schip wijst het kompas evenzeer fout. Deze afwijkingen zijn te wijten aan remanent magnetisme van de ijzeren delen

van het schip, en aan de influentie die zij in het aardveld ondergaan.

Een tweede merkwaardig verschijnsel is de vermindering der intensiteit van het aardmagnetisme binnen

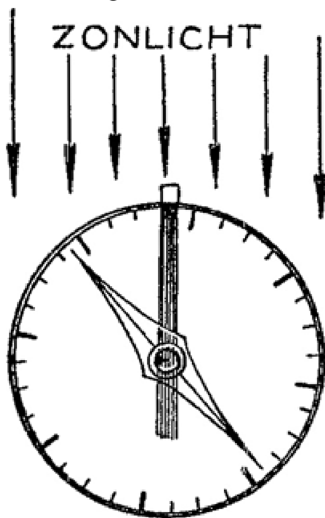


Fig. 85. Vergelijking van de aanwijzing ener magneetnaald met de richting der zonnestralen.

in het schip. Dit onderzoeken we door de snelheid der schommelingen van de magneetnaald te bepalen. Vóór we aan boord gingen, hebben we aan de naald een niet te kleine uitwijking gegeven door even een sleutel in de buurt te houden, en we hebben op de sekundewijzer van ons horloge gekeken hoe lang 10 volle slingeringen duren. In het schip herhalen we deze waarneming (doe deze proef niet vlak bij een mast noch bij de machine), en vinden dat de schommelingen daar langzamer geschieden. Aangezien de magnetische kracht omgekeerd evenredig is met het vierkant van de slingertijd, bewijst dit dat het magnetisme in het schip geringer is: de ijzeren omhulling speelt de rol van een ‘pantser’ dat een groot gedeelte van de krachtlijnen opneemt. Dikwijls vinden we, dat de slingertijd in het schip wel 1,5 of 2 maal groter geworden is, de veldsterkte dus 2 tot 4 maal kleiner.

Het is belangwekkend, de aanwijzing van het kompas waar te nemen als het schip omzwaait of een grote bocht maakt. Leg het kompas op een tafeltje en houd een speld of lucifer vertikaal, zo dat hij schaduw werpt nauwkeurig op het middelpunt van het kompas (fig. 85). Zorg nu, als het schip draait, dat het kompas daar tegen in gedraaid wordt, zodat de schaduw altijd bij dezelfde schaalverdeling van de windroos valt: u ziet dan hoe de naald van stand verandert, en kunt de fout als functie van de oriëntatie optekenen. Door een dergelijke proef is het, dat de invloed van het aardveld op het scheepsmagnetisme wordt onderzocht, en dat men nagaat of de fouten van het kompas voldoende met hulpmagneten en ijzeren staven gecompenseerd zijn.

194. Het normale elektrische aardveld (fig. 86).

Ga op een mooie dag naar een open plein, ver van bomen en huizen; het best is een grasveld met kort gras. Stel op de grond een gewone goudbladelektroskoop, van het soort dat in de meeste scholen als demonstratietoestel gebruikt wordt. De omhulling

van het instrument is nu vanzelf geleidend met de Aarde verbonden; aan de knop bevestigen we een lange geïsoleerde koperdraad, waarvan we het uiteinde enkele meters hoog gaan heffen, met de bedoeling te

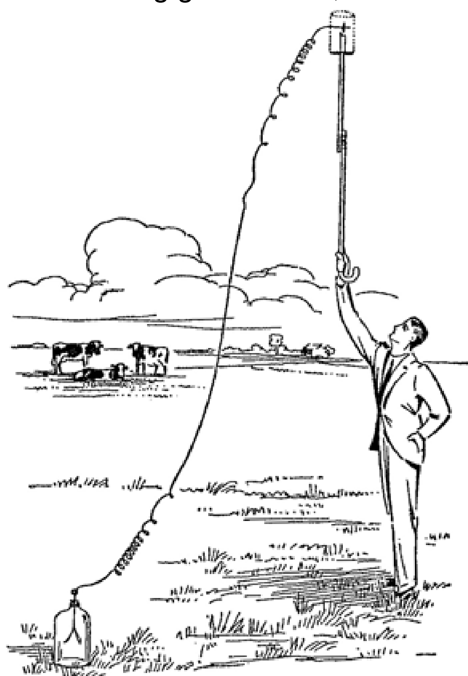


Fig. 86. Meting van het spanningsverval in de dampkring.

onderzoeken of er een spanningsverschil bestaat tussen de aarde en een punt op die hoogte in de dampkring. Natuurlijk moet ervoor gezorgd worden, dat het uiteinde van de draad dezelfde spanning als de omgevende lucht aanneemt. Dit gelukt, door een staaf eboniet of zegellak aan een wandelstok te binden, en daarop een plankje te bevestigen met een brandend kaarsje; de draad van de elektroskoop moet door de vlam gaan; om het kaarsje tegen de wind te beschermen, wordt er een cylinder metaalgaas omheen bevestigd. De kaarsvlam werkt hier als ‘collector’, doordat ze de luchtgassen ioniseert en geleidend maakt.[1)] Liefst moet de ebonietstaaf wel 50 cm lang zijn, anders wordt de potentiaal op de plaats van de vlam merkbaar gewijzigd door de nabijheid van de min of meer geleidende stok en van den waarnemer.

1) Men krijgt een minder goed resultaat met dikke katoendraad, gedrenkt in een oplossing salpeter (KNO_3) van zodanige concentratie, dat hij met een snelheid van 1 tot 2 cm per seconde afbrandt; zulk een pit smeult langzaam en gaat niet door de wind uit (Phys. Zs. **14**, 41, 1913). Of men bevestigt op de ebonietstaaf een blikje met water, voorzien van een klein gaatje waar het water langzaam uit druppelt (druppel-elektrode).

Zodra we de kaarsvlam met de draad hoog in de lucht heffen, slaan de blaadjes van de elektroskoop duidelijk uit; ze vallen weer dicht als men de vlam laat zakken. Het teken der elektroskooplading is gemakkelijk te bepalen, door een staafje zegellak tegen uw mouw te wrijven, en dit voorzichtig dichter bij de elektroskoop te brengen; vallen de blaadjes neer, dan was hun lading eerst positief. U zult vinden dat de Aarde negatief geladen is ten opzichte van de hogere luchtlagen.

Vergelijk de uitslag van de elektroskoop met die welke we verkrijgen door verbinding aan de polen van het stadsnet (220 volt gelijkstroom[1]; het blijkt dat het spanningsverval in de dampkring sterk veranderlijk is van dag tot dag, maar bij goed weer 's zomers gemiddeld 60 volt per meter, 's winters 500 volt per meter bedraagt: een bedrag dat u stellig verrassen zal!

Zodra neerslag gevormd wordt, verandert het normale spanningsverval. Het kan 1000 volt per meter en meer worden, als een regenwolk nadert; het verandert sprongsgewijs van teken bij buien, en nog meer bij onweders.

195. Het ontstaan van onweer en bliksem.[2]

Het elektrische veld,

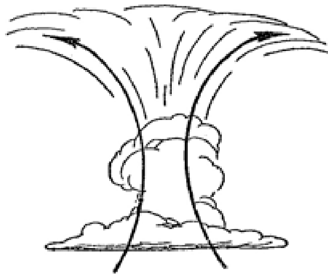


Fig. 87. Het ontstaan van een warmte-onweder.

dat in de dampkring der Aarde bij mooi weer heerst, kan door snelle opstijgende luchtstromen en neerslag ontzaglijk versterkt worden, tot tenslotte een echte ontlading tot stand komt: onweer en bliksem (fig. 87). We onderscheiden in hoofdzaak twee soorten onweders.

1. *Warmte-onweders*. Hiertoe behoort het grootste aantal onzer onweders. Zij ontstaan meest bij dag, maar ook 's avonds en 's nachts, des te

1) In steden met wisselstroomnet is deze ijking niet mogelijk.
2) A. von Hippel, Naturwiss. **22**, 701, 1934. - Hoofdcommissie voor de Normalisatie, Ontwerp-voorschrift voor aanleg van bliksemafleider-installaties V 1014 (met uitvoerige inleiding van E. van Everdingen). - H. Schwenkhagen, Schriften naturf. Ges. Dantzig, **20**, 95, 1937. Nieuwste onderzoekingen in Proc. R. Soc. 1934-1938.

veelvuldiger naarmate men zich van de kust verwijdert. Het weerkaartje vertoont zeer vlakke gebieden van lage druk of ‘zadelgebieden’; dikwijls vertonen op het weerkaartje de isobaren van 1000 en 1050 millibaar S-vormige bochten, zogenaamde ‘onweerszakken’; de barometerdruk is dus niet buitengewoon laag, zoals vele mensen denken. De wind is zwak. Enkele dagen van grote hitte zijn voorafgegaan, en nu is de Aarde zo sterk verhit, dat de toestand van de lucht labiel wordt en dat ze ineens snel begint op te stijgen; daarbij wordt ze kouder, de waterdamp condenseert, en daar vormen zich cumulonimbuswolken, bekroond door een scherm van ijssluiers: de onweerscirri. Het onweert dan dikwijls over een groot oppervlak tegelijk en men ziet het in alle richtingen bliksemen; deze onweders verplaatsen zich weinig, kunnen soms uren aanhouden en zware regenval veroorzaken, maar ze worden niet gevolgd door weeromslag.

2. *Wervelonweders* of *frontonweders*. Deze zijn zeldzamer, zij ontstaan in alle jaargetijden, dikwijls 's nachts, en vooral in de nabijheid van de zeekust. Hun oorzaak is te zoeken in het vooruitschieten van koude zeelucht ('s zomers) of van koude poollucht, die als een wig onder gebieden van warme lucht dringt en die opheft (fig. 53, § 125); daarbij ontstaat afkoeling en neerslag, evenals bij de warmte-onweders. Wervelonweders trekken in breed front vooruit met een snelheid van 30 tot 70 km/uur; van enige invloed van bomen of rivieren op de voortplanting van het onweersfront is zeer weinig te bespeuren - wat de volksmond hierover ook moge beweren! Het aantal ontladingen op één bepaald punt is meest gering, maar dikwijls zijn de bliksemslagen heftiger dan bij warmte-onweders.

Tot deze afdeling behoren de *buien*, waarvan de doorgang een werkelijk groots en prachtig natuurverschijnsel oplevert. Voorafgegaan door een cirrusscherm komt een machtige donkere boog aanrukken. De wind waait naar de bui toe. Op het ogenblik dat de wolkenboog over ons heen trekt, voelen we een plotselinge windstoot, gepaard met regen, sneeuw, hagel en dikwijls met onweerontladingen. De barometer schommelt plotseling: een daling, gevolgd door een stijging. De wind is omgeslagen en waait van de achterzijde van de bui; tevens is de temperatuur plotseling sterk gedaald: we bevinden ons nu in de wig van koude lucht die vooruitglijdt, en die haar koude temperatuur bewaart door de sterk afgekoelde neerslagen. Snel klaart de hemel op.

Het snelle opstijgen van de lucht kan nu op verschillende wijzen aanleiding geven tot versterking van het elektrische veld. De twee belangrijkste dezer verschijnselen zijn de volgende (fig. 88).

a. Wanneer een plotselinge windstoot in enkele honderdsten van een sekunde een regendruppel uit elkaar blaast, vormen

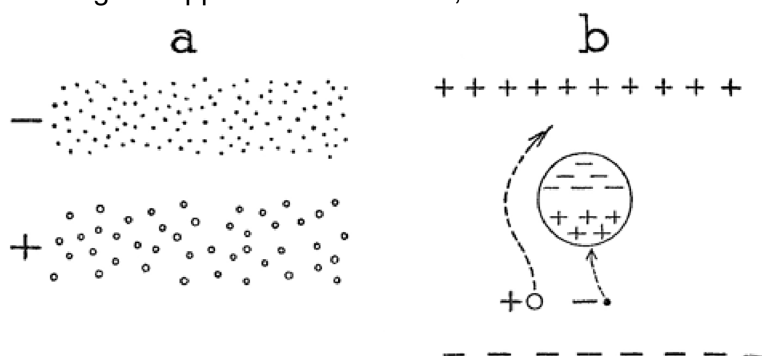


Fig. 88. De versterking van het potentiaalverval in de dampkring bij onweders. *a*. tengevolge der waterval-elektriciteit; *b*. tengevolge der influentie.

zich talloze zeer kleine druppeltjes, die negatief geladen zijn; en een kleiner aantal grotere druppeltjes, positief geladen. De grotere druppeltjes vallen, en de fijnere worden door de luchtstroom zwevende gehouden of stijgen mee (Lenard's watervalelektriciteit; fig. 88*a*).

b. In het normale lucht-elektrische veld wordt een regendruppel door influentie geladen: onder positief, boven negatief. Als zulk een druppel door de lucht valt, ontmoet hij positief geladen deeltjes en negatief geladen deeltjes: zogenaamde ionen. De negatieve ionen zijn het bewegelijkst, komen op hem af en worden gevangen; de positieve ionen worden eerst afgestoten en kunnen daarna niet intijds de druppel vervoegen (fig. 88*b*). Zo slepen vallende regendruppels voornamelijk negatieve ladingen met zich mee (theorie van Wilson). Naarmate het ene of het andere effekt overheerst, ziet men dat het spanningsverval van boven naar beneden of van beneden naar boven gericht kan zijn.

De waarnemingen hebben geleerd, dat in grote trekken de wolken van een warmte-onweder aan de bovenkant positief

geladen zijn, aan de onderkant negatief (proces *b*); maar dat er bijna altijd ook een geïsoleerd gebied van positieve lading voorkomt, helemaal onderaan, daar waar de lucht het snelst opstijgt en de regen valt (proces *a*).

Tenslotte verschijnt de bliksem. De vroegere opvatting was, dat er zulk een grote spanning ontstond tussen een wolk en de Aarde, dat op een gegeven ogenblik de doorslagspanning der lucht overschreden werd, en de bliksem als een reusachtige vonk de ladingen overbracht en de spanningen vereffende. Intussen zijn we door tal van onderzoekingen heel wat meer van de bliksem te weten gekomen, en hebben met uiterst vernuftige toestellen zijn ontwikkeling om zo te zeggen op den voet kunnen volgen; we weten nu, dat dit natuurverschijnsel geheel anders verloopt dan men oorspronkelijk dacht (fig. 89).

Zelfs vlak voor de ontlading is het veld tussen Aarde en wolk nog vele malen zwakker dan wat voor een echte vonk nodig zou zijn. Het sterke veld ontstaat ergens in de wolk door ruimteladingen, maar strekt zich slechts over een beperkt gebied uit. De negatieve ionen, die het bewegelijkst zijn, krijgen in het sterke veld een zo grote snelheid, dat ze bij botsing tegen de luchtmolekulen deze ioniseren, d.w.z. op hun beurt in ionen verdelen; van die nieuw gevormde ionen voegen zich de negatieve bij de ionen die wij al hadden, en zo ontstaat - volgens het sneeuwbal-systeem - een echte ‘lawine’ van negatieve ionen! De positieve ionen echter blijven achter, het veld vervormt zich: de grootste veldsterkte vindt men niet meer tussen A en B, maar tussen C en D (fig. 89*b*). De ontlading dringt dus dieper en dieper; het sterke veld verschuift mee, maar het is steeds beperkt tot een zeer klein volume, n.l. juist tot die plaatsen waar de ontlading groeiende is. De ontladingsbaan bereikt punten die oorspronkelijk veldvrij waren, eindelijk - min of meer bij toeval - raakt ze de Aarde. Deze hele ontwikkeling heeft zich in rukjes voltrokken, met een gemiddelde snelheid van de orde 500 km/sec, in elk geval dus in een zeer klein breukdeel van een sekunde. Tevens zijn er in alle richtingen zijdelingse vertakkingen gevormd. We noemen deze ontlading: *de vóórslag*.

Nauwelijks is de Aarde bereikt, of een nieuw verschijnsel ontstaat: *de hoofdslag*, die bestaat in een snel vereffenen der spanningen langs het reeds gevormde kanaal, waarin de lucht goed geleidend is geworden door de ontlading. Met een snelheid van 150000 km/sec. (de helft van de lichtsnelheid!) loopt de ontlading van de Aarde naar de wolk terug.

Hiermede is *een gedeeltelijke ontlading* afgelopen. De gehele bliksem bestaat uit verscheiden van die gedeeltelijke ontladingen, ieder dus uiterst kort, maar met tussenruimten van 0,01 sec.

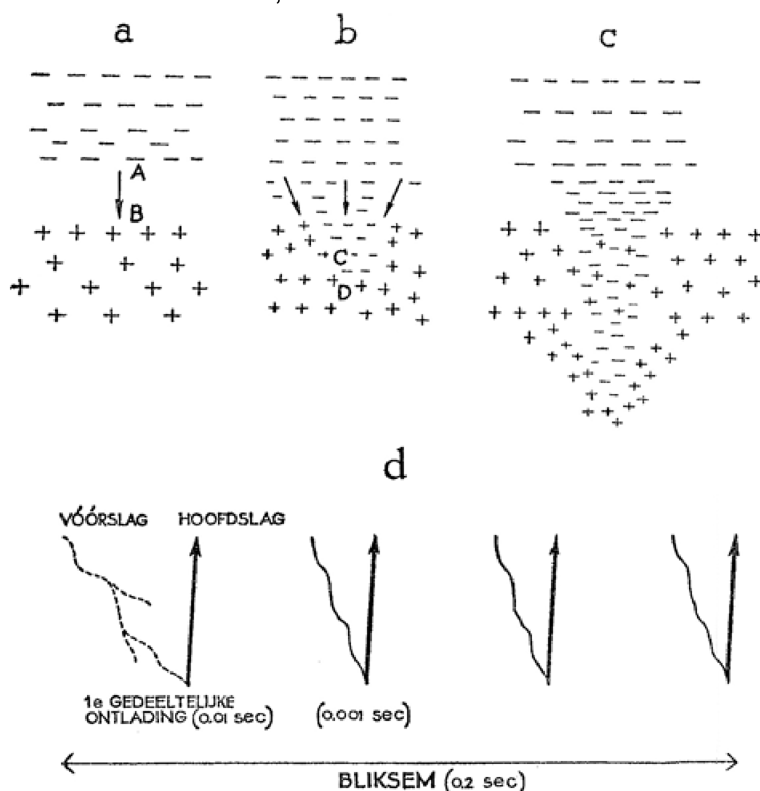
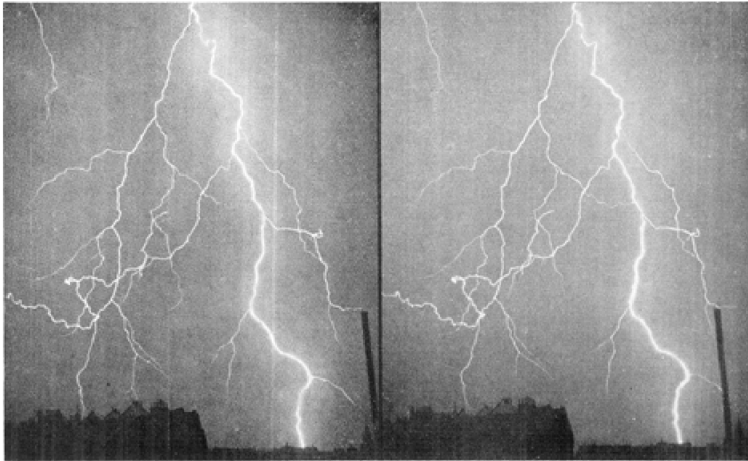


Fig. 89. Het ontstaan van de bliksem. *a, b, c:* het begin van de vóórslag; *d*: overzicht der ontladingen waaruit één bliksem bestaat.

tot 0,1 sec., en die zich samen over wel enkele tiendedelen ener sekunde kunnen uitstrekken (fig. 89*d*).

Zij ontstaan door de achtereenvolgende ontlading van de onderscheidene ladingscentra der wolk, die een voor een verbinding zoeken met het reeds gevormde kanaal. Van de tweede gedeeltelijke ontlading af bemerkt men dat de vóórslag niet meer in rukjes vooruitschiet, maar ineens (snelheid nu 5000 km/sec),



PLAAT XIV.
Stereoskopische foto van de bliksem.
Achter in dit boek bevindt zich een tweede afdruk van deze plaat, geschikt om in de stereoskoop bekeken te worden.
Naar B. Walter, Physik. Zs. **13**, 1096, 1912.

terwijl de zijtakken verdwijnen: de geleidende baan wordt nu verder onveranderlijk gevolgd.

Het netto-resultaat van de bliksemontlading is, dat negatieve lading naar de Aarde wordt gevoerd. Vermoedelijk is het door het grote aantal onweders die zich voortdurend over de aardbol ontladen, dat de negatieve lading der Aarde tegenover de dampkring in stand gehouden wordt, en dat ook het normale veld bij mooi weer verklaard moet worden.

196. De bliksem.[1)]

Bepaal de lengte van een ver verwijderde bliksem uit de hoek α (in radialen) waaronder u hem ziet; de tijdsafstand tussen bliksem en donder geeft u zijn afstand A (§ 106, 200, 218). De lengte van de bliksem is dus αA.

Men vindt op die wijze dat de bliksem meestal 1 tot 3 km lang is, maar soms 10 en zelfs 50 km bereikt. Uit foto's en uit het onderzoek van blikseminslag besluit men, dat het bliksemkanaal 40 tot 50 cm middellijn heeft; maar het grootste deel van de ontlading schijnt door een buis van slechts enkele cm middellijn te stromen. De stroomsterkte bedraagt tot 30000, in zeldzame gevallen tot 200000 Ampère (vgl. § 211). Om het vermogen van deze ontzagwekkende elektriciteitsbron behoorlijk te waarderen, moet men bedenken dat er bij sommige onweders duizenden bliksems gevormd worden, en dat er over de gehele wereld gemiddeld honderd per sekunde ontstaan.

Het schijnt moeilijk, de vorm van de bliksem goed waar te nemen; althans is de overgeleverde zigzagvorm, die de schilders hem vroeger en nu nog geven, geheel bezijden de waarheid. De ware vorm is slechts duidelijk geworden sedert men foto's van de bliksem is gaan maken (plaat XIV). Ik verbeeld me, dat ik duidelijk de algemene slingerende en grillige vorm van de bliksem met zijn vertakkingen kan waarnemen; maar dit zal wel zijn doordat ik de foto's gezien heb.

De kleur van de bliksem is in de nacht gemakkelijker na te gaan dan overdag, hetzij dat men naar de bliksem zelf kijkt, of naar een blad papier dat door hem verlicht wordt. Het aantal

1) Een aantal verhandelingen van E. Mathias in C.R. **179** en volgende tot **195**, 1932. - Arago, Oeuvres, deel **4**, en Flammarion, Caprices de la Foudre bevatten een groot aantal feiten, maar moeten *zeer kritisch* gelezen worden. Hun theorieën zijn natuurlijk hopeloos verouderd.

witte, rode en blauwe bliksems schijnt ongeveer even groot te zijn, de violette en gele zijn half zo talrijk, de oranje en groene een vierde maal zo talrijk; anderen vinden 2 maal zoveel rode als blauwe. Men heeft wel beweerd, dat rode bliksems gewoonlijk gevolgd worden door rollende donder, blauwe door kraken, witte door knallen, terwijl de groene met een bijzonder sterk gedonder zouden samengaan; blauwe bliksems zouden gepaard gaan met hagel (?).

Vermoedelijk ontstaat de rode bliksem als er regen in de lucht is, en de door de ontlading vrijgemaakte waterstof de bliksem kleurt met licht van de rode waterstoflijn Hα; bij afwezigheid van regen ziet men alleen de uitstraling van zuurstof en stikstof en lijkt de bliksem wit. Zo zou men ook kunnen begrijpen dat de witte bliksems gemiddeld meer tot brand aanleiding geven dan de rode: de voorwerpen zijn niet nat, dus brandbaarder, daarenboven wordt de bliksem minder goed afgeleid.

Het 'nalichten' van de lucht na de bliksem, dat men soms kan waarnemen, is niet te wijten aan fosforescentie, maar aan de na-ontladingen door dezelfde bliksembaan.

Als de bliksem vlak bij ons inslaat, hoort men soms een scherpe knal, soms een scheurend geluid of gesis, dat tegelijk met de lichtflits wordt waargenomen, dus een breukdeel van een sekunde vóór de donder.[1)] Dit schijnt vooral opgemerkt te zijn door personen die zich dichtbij een geaarde geleider bevonden.

Men beweert, dat bij zware onweders de dieren al de sterke ontladingen 'voelen aankomen': de hond blaft een breukdeel van een sekunde vóór de bliksemflits, kippen geven alarm. Vroeger verklaarde men de gedragingen dezer dieren door te zeggen, dat ze op een of andere manier de sterke velden merken die aan de bliksem voorafgaan. Nu we echter weten dat deze velden er helemaal niet zijn, tot op het ogenblik dat de ontlading de Aarde bereikt en de hoofdslag doorgaat, is er alle reden om deze oude waarnemingen kritisch te onderzoeken en aan nieuwe ervaring te toetsen.

De geur van de bliksem, die men na onweders duidelijk merken kan, is dikwijls beschreven als een 'zwavellucht', maar heeft daar natuurlijk niets gemeens mee: hij is waarschijnlijk toe te schrijven aan het mengsel van stikstofoxyden dat bij de ontladingen ontstaat.

Donder: zie § 40.

1) Nat. **115**, 801 en 912; **116**, 98 en 499, 1925.

197. De duur van de bliksem.

Hoe lang duurt de bliksemontlading? We krijgen er een denkbeeld van, door in de nacht bewegende voorwerpen te bekijken die door de bliksem verlicht worden: een rijdende trein, boomtakken door de wind bewogen. Het blijkt nu dat dikwijls deze voorwerpen scherp worden gezien, als stonden ze volkomen stil; maar dat het toch soms voorkomt dat zij in beweging worden waargenomen.[1)] Dikwijls heeft de bliksem iets *flikkerends*, dat op achtereenvolgende ontladingen wijst. Dit onderzoek kan nu veel nauwkeuriger worden uitgevoerd met de draaiende schijf.

We nemen een schijf van zwart karton, 10 cm in diameter, en trekken daarop met krijt één duidelijke straal (ca. 4 mm dik). Nu moet deze schijf draaien met een snelheid van bijvoorbeeld 50 omwentelingen per sekunde, wat men bereikt door ze op de as te monteren van een elektrische ventilator. Is men tevreden met een kleinere snelheid, dan prikt men er eenvoudig een spijker door, en doet de schijf als een tol met de hand draaien.

Wacht tot er eens een nachtelijk onweer komt en onze schijf af en toe door de bliksems verlicht wordt. We draaien het licht uit en brengen ze aan het draaien. Bij één goed afzonderlijke bliksem zien we het volgende.

1. Soms een volmaakt scherp beeld van de lichtlijn; de duur van de bliksem is dan kleiner dan 0,0002 sec ongeveer (waarom?).
2. Vaker zien we twee of drie afzonderlijke beelden van de witte lijn, die het oog tegelijk waarneemt tengevolge van het voortduren der lichtindrukken (I, § 80); *dit is een bewijs dat de bliksem in 't algemeen uit achtereenvolgende gedeeltelijke ontladingen bestaat*; de afstand der beelden kan zeer verschillend zijn.
3. Soms vloeit de witte lijn alleen aan de randen een weinig uit, wat zou wijzen op het nalichten van een enkelvoudige ontlading, bijvoorbeeld gedurende 1/1000 sec.
4. In zeldzame gevallen licht de gehele schijf of een deel daarvan gelijkmatig grauw op.

Deze resultaten zijn in hoofdzaak bevestigd door de moderne onderzoekingen langs fotografische weg (§ 198).

1) C.R. **109**, 12, 1889.

198. Bliksemfoto's. (Plaat XIV, XV).[1]

Hoe fotografeer ik een zo onverwacht en vluchtig verschijnsel? - Dat gaat vanzelf, als u een nachtelijk onweer kunt waarnemen. U stelt de camera in op zeer verre afstand ('op oneindig'), richt op de onweerswolk, zet de sluiter open, en wacht eenvoudig tot er een mooie bliksem in die richting verschenen is. Maak nu de sluiter dicht en ontwikkel. De resultaten zijn in 't algemeen verrassend fraai, en het is zo eenvoudig!

Op dergelijke fot's is vooreerst de algemene vorm van de bliksem te bestuderen, die aan een rivier met haar bijrivieren en beken herinnert. Het schijnt wel, dat de bliksems die van een negatief geladen wolk naar de aarde slaan, minder zijontladingen vertonen dan de bliksems die uit een positieve wolk komen. De lengte van de bliksem is te bepalen door uitmeten van het beeld, en te bedenken hoeveel maal het verkleind is: die faktor is de afstand van camera tot bliksem (bepaald uit de tijdsruimte tussen bliksem en donder), gedeeld door de afstand lens-film (= de brandpuntsafstand der camera). Voorbeeld:

$$\text{lengte van bliksem} = 3 \text{ cm op de plaat} \times \frac{4 \text{ km}}{15 \text{ cm}} = 800 \text{ meter.}$$

Dikwijls komt het voor dat men opnamen krijgt waarop de bliksem door de wind zijdelings verplaatst is tijdens de ontlading, zodat ze enigszins op een breed lint gelijken; daaraan kan men soms waarnemen, dat de ontlading niet ineens, maar in verschillende achtereenvolgende stoten gebeurd is. Hebben we de afstand van de bliksem bepaald uit de tussenruimte bliksem - donder, dan is uit de opname ook te berekenen over welke afstand de wind de bliksem heeft verplaatst tijdens de opname: men vindt soms afstanden tot een meter of tien.

Wanneer dergelijke *bandbliksems* echt zijn, dus niet ontstaan door een toevallige beweging van de camera, wijzen zij op een uitzonderlijk lange duur van de ontlading of althans op een groep ontladingen.

Het ligt nu voor de hand, dat we een dergelijke ontleding van het bliksemverschijnsel nog veel beter kunnen verkrijgen, door de camera een langzame draaiende beweging te geven.[1] Druk de camera met de twee handen tegen u aan, en draai u zeer langzaam, ongeveer over ¼ slag in 5 sekunden, terwijl u

1) Br. Walter, Phys. Zs. **30**, 261, 1929; **35**, 88, 1934; Ann. d. Phys. **10**, 393, 1902; Met. Zs. **51**, 139, 1934.

1) Br. Walter, Phys. Zs. **30**, 261, 1929; **35**, 88, 1934; Ann. d. Phys. **10**, 393, 1902; Met. Zs. **51**, 139, 1934.

tevens een haartje in vertikale richting kantelt. De bliksemopname zal nu verschillende, bijna evenwijdige ontladingsbanen vertonen, die dus eigenlijk op dezelfde plaats maar na elkaar zijn gevormd (Plaat XV*b*). Met het vergrootglas ziet u, hoe verscheiden dezer *gedeeltelijke ontladingen* fijne zijtakken vertonen. De verschillende gedeeltelijke ontladingen hebben niet altijd nauwkeurig dezelfde weg gevolgd, soms is er een plotseling van richting veranderd, gebruik makend van een reeds gevormde zijtak. Stel dat de verschillende ontladingen ongeveer 2 mm van elkaar verwijderd zijn; we schatten, dat we aan de camera één omwenteling in de 18 sekunden hebben gegeven, en de brandpuntsafstand is 12 cm; dan is het tijdsinterval tussen de ontladingen:

$$\frac{2 \times 18}{2\pi \times 120} = \frac{1}{20}$$

sec ongeveer. Deze tussenruimten blijken nooit meer dan 0,2 sec te bedragen, de totale tijdsduur kan 1 sec bereiken.

Onmiddellijk na een sterke ontlading kan er soms een tweede ontlading van een *ander* punt der wolk uitgaan, en gebruik maken van een deel der reeds gevormde bliksembaan. - Een andere maal weer vindt men verschil tussen een bliksem die inslaat op goed geleidend water en op slecht geleidende grond: in het tweede geval verschijnt een soort na-ontlading. - Meer dan eens vindt men, dat de eigenlijke ontladingen gevolgd werden door een continu nastromen der elektriciteit langs de bliksembaan, hetgeen op onze opnamen als gelijkmatige verlichting te voorschijn komt (Plaat XV*b*).[1)] Het is geen fosforescentie: het licht is niet in elk punt evenredig met de sterkte van de bliksem. het variëert grillig in de loop van het nastromen. Soms is er eerst een pause van b.v. 0,01 sec tussen ontlading en nastromen. - Andere bliksemopnamen vertonen weer een merkwaardige dwarse streping.[2)]

Zo is er met eenvoudige middelen een schat van gegevens te verkrijgen, en zo kan men het bliksemverschijnsel met fijn onderscheidingsvermogen in zijn ontwikkeling volgen. De aldus verkregen uitkomsten zijn in de allerlaatste tijd aangevuld door buitengewoon belangwekkende onderzoekingen met speciale camera's, voorzien van sneldraaiende lenzen of van bewegende film. Het is daarbij gebleken, dat elke gedeeltelijke ontlading uit een vóórslag en een hoofdslag bestaat, die met grote snelheid

1) Ann. d. Phys. **18**, 863, 1905. Vgl. ook § 197.
2) Ann. d. Phys. **19**, 1032, 1906.

eerst naar de Aarde en dan terug naar de wolk lopen, op de reeds hoger geschetste wijze (§ 195).

Een andere mogelijkheid, die weer wel binnen ons bereik ligt, is het verkrijgen van *stereoskopische opnamen*, door twee (stilstaande) camera's gelijktijdig te gebruiken. Men krijgt aldus twee foto's van uit een ietwat verschillend standpunt, die stereoskopisch gecombineerd kunnen worden, en dan de ligging van de bliksembaan met al zijn krommingen in de ruimte vertonen[1)] (Plaat XIV).

Bij het opnemen van bliksemfoto's dient men verdacht te zijn op enkele fotografische effekten, die den onervarene wel eens in de war hebben gebracht! Soms is per ongeluk een melkglaslamp op de plaat gekomen en voor een bolbliksem gehouden. Een wisselstroomlamp in de verte gaf met een bewegende camera een stippellijn en werd een ‘parelsnoerbliksem’. - Andere malen vond men *zwarte* bliksems op de plaat!! Dit merkwaardige effekt ontstaat, als de plaat door de belichting van de wolken bijvoorbeeld eerst een algemene vóórbelichting heeft gekregen; het beeld van de eigenlijke bliksembaan, daarop gesuperponeerd, wordt dan fotografisch omgekeerd.[2)]

Men heeft wel eens beproefd of de bliksem ook Röntgenstralen bevat, - een onderstelling die zeker niet onmogelijk lijkt -[3)]. Een fotografische plaat werd in zwart papier gewikkeld, en aan 300 bliksems blootgesteld. Na ontwikkeling was de plaat nog geheel helder. Die proef, welke we gemakkelijk kunnen herhalen, viel dus negatief uit.

199. Het luchtelektrische veld gedurende een onweer.

De volgende proef heb ik niet zelf genomen, ze lijkt echter veelbelovend.

Neem een vrij groot vat, met een kraan waaruit het water in een mooi fijn straaltje loopt; het kan bijvoorbeeld ook een emmer met een hevel zijn (fig. 90). - Dit straaltje is bovenaan een samenhangend watercylindertje, lager lost het zich op in druppels, die zo snel voorbijschieten dat men ze niet goed afzon-

1) Br. Walter, Phys. Zs. **13**, 1082, 1912.
2) Wood, Science, **10**, 717, 1899. De omkering ontstaat slechts, als de bliksembelichting korter dan 1/50000 sec. duurt.
3) Naturwiss. Rundschau, 1892.

derlijk ziet, maar die toch de straal ondoorzichtig maken en doen glinsteren. De emmer rust op drie isolerende blokjes paraffine.

Stel dit toestel ergens buiten als een onweer nadert, liefst ver van huizen en bomen, en merk op wààr precies de straal zich in druppels begint te verdelen.

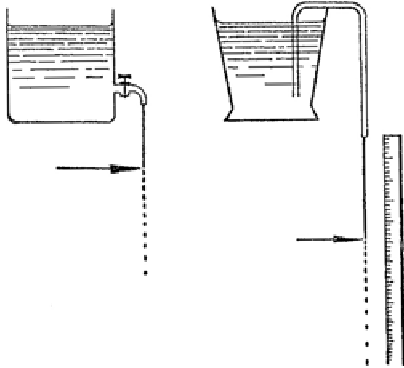


Fig. 90. Invloed van de onweerselektriciteit op een uitstromende waterstraal.

Het schijnt nu, dat bij het voorbijgaan van het onweer de straal over een veel groter lengte gaat samenhangen dan anders.[1] Inderdaad is een dergelijke vloeistofstraal een zeer gevoelig reagens op elektrische velden, het is welbekend dat hij ineenvloeit zodra men een gewreven lakstang in de buurt houdt.

Anderen hebben weer waargenomen dat de waterstraal zich net vóór de bliksem in fijne druppeltjes verdeelt, terwijl hij onmiddellijk na de ontlading weer samenhangend wordt.[2] Dit lijkt moeilijker te begrijpen, vooral omdat we weten, dat de bliksem niet door een bijzonder veld voorafgegaan wordt.

Deze proef is ongevaarlijk. Daarentegen is Franklin's beroemd vliegerexperiment *levensgevaarlijk* en kan alleen door deskundigen herhaald worden![2]

200. Tijdsafstand tussen bliksem en donder. De banen der onweershaarden.[3]

Het is welbekend dat men de afstand van een bliksemontlading bepalen kan uit het tijdsverschil 'tussen licht en slag'; 1 sekunde komt overeen met 340 meter.

Ieder natuuronderzoeker moet sekunden kunnen tellen zonder uurwerk; men oefent zich door tot 60 te tellen en daarna op 't horloge te kijken, of er inderdaad een minuut verlopen is. Zakhorloges hebben een sekundewijzer, maar tikken vijfde

1) Mc. Adie, Nat. **40**, 223, 1889.
2) Americ. Met. Journ. **8**, 97, 1891.
2) Americ. Met. Journ. **8**, 97, 1891.
3) A.J. Aalders, Hemel en Dampkring, **14**, 1916 en **15**, 17, 1917.

delen van een sekunde; het meetellen op 't gehoor vergt enige oefening. De goedkope wekkers tikken 200 maal per minuut: dit is juist erg praktisch voor het bepalen van de afstand van een onweer: want in een minuut legt het geluid 340 × 60 = 20400 m af, dus vrijwel 100 meter per tik van de wekker.

Gedurende een tropisch onweer zag een waarnemer[1)] een

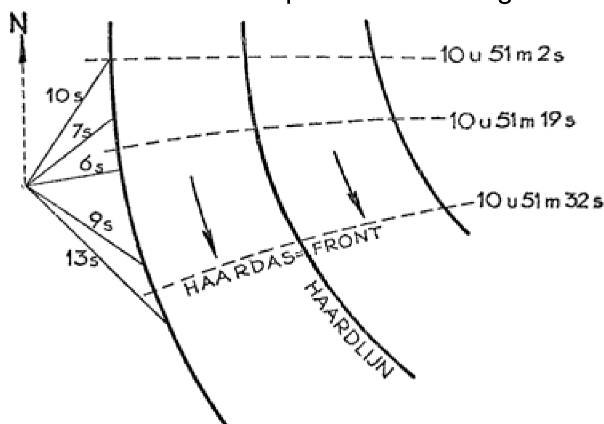


Fig. 91. De weg van een voorbijtrekkend onweer, bepaald uit het tijdsverschil tussen licht en slag.

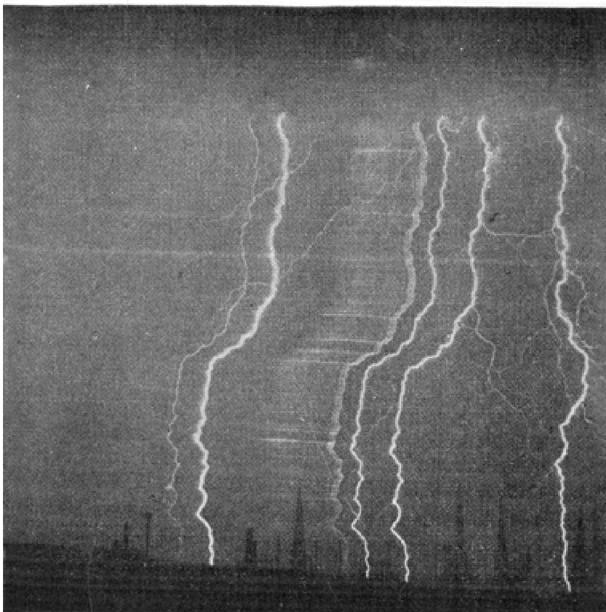
felle bliksem vlak boven zijn hoofd, en hoorde de donder slechts 18 sec. later: deze bliksem was dus 6000 m hoog!

Van de meting der tijdsverschillen tussen licht en slag kan men gebruik maken om de weg van een onweer te volgen. Met een kompas wordt de richting bepaald waarin men de bliksem ziet, het tijdsverschil geeft de afstand. We doen dit voor de achtereenvolgende bliksems, zo dikwijls mogelijk, en tekenen nu op schaal de punten waar de onweerswolk zich achtereenvolgens bevond; zij vormen samen de *haardlijn* (fig. 91). - Een andere manier is, een plankje dat om een spijker draait als vizier gebruiken om de richting van de bliksem te bepalen; men trekt telkens een rechte lijn langs het plankje, op een blad zuiver georiënteerd papier, en kan bij elke richtlijn de bepaalde afstand schrijven.

Wat de waarnemingen bemoeilijkt is, dat er meestal verscheiden

1) Zs. f. Met. **5**, 276, 1870.





PLAAT XV.
Opnamen van de bliksem.
Boven: op stilstaande camera.
Beneden: op bewegende camera; tussen de eerste bliksem (rechts) en de laatste (links) verliep ongeveer 0,5 sekunde.
Beide opnamen zijn *tegelijk* gemaakt.

onweershaarden tegelijk in min of meer evenwijdige richtingen over het land trekken. Het is dus zaak, te trachten altijd *dezelfde* onweerswolk in het oog te houden, en de op zichzelf prachtige methode niet blindelings, maar met enig verstand toe te passen! Sommigen beweren dat de haarden slechts een paar honderd meter groot zijn en dat men zuivere lijnen vindt als men ze maar nauwkeurig volgt. Met oefening kan men zover komen, dat men de verschillende haardlijnen gelijktijdig opneemt, en dan ook *haardassen* of *onweersfronten* kan tekenen: het zijn lijnen die voor één gegeven ogenblik alle ontladingspunten verbinden; men vindt ze uit de tijden die we overal hadden bijgeschreven (fig. 91). Er zijn aanwijzingen voor, dat de snelheid der fronten wel eens veel kleiner kon zijn dan die van de bui als geheel.

Afstand van grootste hoorbaarheid van de donder: zie § 14.

201. Invloed van de bliksem op de regen?

Dit is een oud verhaal dat telkens weer terugkeert, en waarvan de juistheid nog niet uitgemaakt is. Als men bij een onweersbui het geruis van de regen nu en dan plotseling hoort versterken, ligt het voor de hand die versterkingen in verbinding te brengen met bliksemontladingen. Bedenk echter wel, dat de regen een hele tijd nodig heeft om van de wolk naar beneden te komen. Het lijkt dus niet onmogelijk, als een waarnemer beweert dat hij telkens 1¾ minuut na de bliksem zulk een toeneming van de regen hoorde;[1] die tussenruimte zou overeenkomen met een valhoogte van de orde 8 m × 105 = 840 m. Dit klopte met de tijdsafstand bliksem - donder (2 tot 3 sec.); aannemend dat de bliksem hoog aan de hemel van de ene wolk naar de andere overging, is dit een niet te slechte maat voor de hoogte van de onweerswolk, en men kan dus zeggen dat de overeenstemming goed is.

Nieuwe waarnemingen zijn nodig! Vgl. ook I, § 126.

202. Bliksem en donderslag bij heldere lucht.

1. Iedereen kent de stille ontladingen op een warme zomeravond, ware oppervlakte-bliksems (§ 203), die soms geruime tijd lang telkens en telkens weer opflikkeren, een aanzienlijk deel van de hemel tegelijk verlichtend, terwijl geen geluid gehoord wordt. ‘‘t Is de luwte die speelt’, zegt men in Vlaanderen. Dit

1) Wetter, **26**, 43, 1909.

verschijnsel heeft geen invloed op de verdere ontwikkeling van het weer.

2. In andere gevallen ziet men de lucht af en toe verlicht door bliksems van een ver verwijderd en soms onhoorbaar onweer; het licht van de bliksem is veel verder zichtbaar dan het geluid te horen is.
3. Soms was de lucht niet werkelijk ‘helder’: de onweerswolken waren er, echter niet boven ons hoofd, maar lager aan de hemel. Het komt vrij dikwijls voor dat de bliksem schuin verloopt, b.v. 45° met het waterpasvlak helt, zodat de plaats waar hij inslaat verscheiden km verwijderd kan zijn van de wolk; in een bepaald geval was het zelfs 4,5 km.
4. Oudere waarnemers verhalen van donder zonder bliksem, van donder bij heldere lucht.[1)] Al die berichten moeten met voorzichtige kritiek gelezen worden!

203. Oppervlaktebliksem, weerlicht.

Dikwijls ziet men hoe wolken in hun geheel verlicht worden door een bliksem die soms zelf achter een wolk verborgen is. Geheel anders zijn de echte oppervlaktebliksems, die waarschijnlijk ‘glimontladingen’ zijn tussen de waterdruppeltjes van de wolk, wellicht in de hoge lagen van de dampkring waar de drukking al veel geringer is dan hier beneden; er is beweerd dat zij een bandenspektrum vertonen, terwijl de echte bliksem een lijnenspektrum heeft - maar dit is op zijn minst nog twijfelachtig.

204. Bandbliksem.

We hebben al opgemerkt, dat bliksems die er op een foto lintvormig uitzien die eigenaardigheid te danken hebben aan het meevoeren der ontladingsbaan met de wind. Merkwaardig blijft het verschijnsel daarom toch nog, want de gevonden afmetingen wijzen op een zeer grote duur van dit bliksemverschijnsel: de bandbliksem is een bliksem die abnormaal lang duurt. Hiermee enigszins in overeenstemming is een waarneming, waarbij men drie bandbliksems gedurende wel 20 sekunden in de lucht zag hangen;[2)] en een ander geval, waarin de bandbliksem in een bolbliksem overging.[3)]

1) Arago, Oeuvres. **4**, 84 (Le Tonnerre).
2) Nat. **53**, 272, 1896.
3) Nat. **49**, 577, 1894.

De dwarse streping ontstaat, doordat de baan onregelmatig gekronkeld is, zodat we op sommige punten meer loodrecht, op andere meer schuin op de richting der baan kijken; bij zijdelings verplaatsen geeft dit heldere en minder heldere arcering. Daarenboven liggen bepaalde delen van de baan meer evenwijdig aan de richting van de windverplaatsing, andere meer loodrecht daarop.

205. Parelsnoerbliksem.[1)]

Herhaaldelijk waargenomen, zelfs al gefotografeerd is een bliksemvorm die uit een aantal lichtstreepjes of lichtbolletjes bestaat, als een stippellijn. Men merkt dat er iets bijzonders is, doordat de meeste bliksems nalichten, wel 1 sekunde lang, en dan soms in een oranje of roodachtig kralensnoer uiteenvallen; bijna altijd is het de laatste ontlading van een groep bliksems die deze eigenaardigheid vertoont. Ziet men één parelsnoerbliksem, dan is er grote kans dat tijdens ditzelfde onweer het zeldzame verschijnsel nog opnieuw zal optreden.

Uit de afstand bliksem - donder kan men de ware afmetingen schatten. In de meeste gevallen was er een centrale draad van slechts een 3-tal cm dikte; daarop ‘geregen’ zitten korrels van 25-80 cm; streepjes zijn van de orde van 30 m lengte en enkele centimeters dikte, gescheiden door tussenruimten van 20 m. Bij een bepaalde waarneming hing de wolk zeer laag, de kralen waren ongeveer 7 m × 5 m groot en bevonden zich op afstanden van ruim 7 m van elkaar, verbonden door een roodachtig kanaal van 3 m middellijn. Een ander maal zag men de normale bliksembaan zich in 0,1 sec. verbreden tot 3,50 m breedte, dan uiteenvallen in lichtbollen van 3 m middellijn, die zich in de loop van 2 sekunden samentrokken tot 1 m middellijn en dan verdwenen.

Het is niet onwaarschijnlijk dat er eerst een gewone lijnbliksem ontstaat, bijna onmiddellijk gevolgd door het eigenlijke parelsnoer. De afwezigheid of aanwezigheid van een centrale draad zou dan verklaard worden door de grotere of kleinere tijdsruimte tussen lijnbliksem en snoer. - Naar een theorie van het verschijnsel moet men liever niet vragen: daar is niets van bekend!

Uit alle schetsen en foto's krijg ik de indruk dat de parelsnoerbliksem enkelvoudig en onvertakt is. Is dat algemeen zó?
[2)]

1) E. Mathias, C.R. **192**, 653; **193**, 1140 en 1375. - Met. Zs. **27**, 83, 1910.
2) Toepler, Met. Zs. **34**, 225, 1917.

Misschien behoort ook tot de parelsnoerbliksems een merkwaardige schroefvormige bliksem.[1)]

206. Bolbliksem.[2)]

Aan het werkelijk bestaan van dit verschijnsel valt niet te twijfelen, ongelukkiglijk is het even veranderlijk als zeldzaam: ongeveer 2% van de inslaande bliksems zouden deze vorm vertonen. Als een bolbliksem verschijnt, dan is het bijna altijd direkt na een heftige blikseminslag en vlak bij de inslagplaats; soms vormen er zich verscheidene tegelijk.

Men ziet een ronde of iets afgeplatte vuurbol, meestal van 5 tot 30 cm groot, soms zo groot als een wagenwiel, zelfs tot 20 m toe.[3)] Hij is meestal roodachtig, in enkele gevallen door een diffuse gloed omgeven of onregelmatig uitgerafeld, alsof hij in snelle omwenteling verkeerde; slechts zelden is hij wit van kleur en scherp begrensd. Hij verschijnt op eens in de lucht, ofwel hij vertoont zich op een of ander voorwerp. Zodra hij dicht bij de aarde is gekomen verplaatst hij zich niet snel meer, 'als een voorbijvliegende vogel', met een snelheid van b.v. 2 m/sec.; hij kan ook even stilstaan. Soms volgt hij de goot of de bliksemafleider of de lichtleiding buiten, andere malen legt hij een volmaakt grillige baan door de lucht af, onafhankelijk van de windrichting; maar men krijgt wel de indruk dat hij toch een neiging tot vallen heeft, dus zwaarder is dan de lucht. Raakt hij de grond, dan kaatst hij terug als een gummibal. Ook bij gesloten deuren kan hij in de kamer binnendringen, dwars door panelen, vensters, muren zelfs. Soms is hij omhuld door rook, of laat hij achter zich een regen van vonkjes. Men hoort een sissend, zoemend of fladderend geruis. Na een duur van een paar sekunden tot verscheidene minuten ziet men de vuurbol meestal uitzetten en in stilte verdwijnen; soms echter ontploft hij tengevolge van een schok met een zwakke of sterke knal, korte bliksems uitzendend, en men ruikt een scherpe 'zwavellucht' (ozon? stikstofoxyden?) terwijl er een lichte nevel blijft hangen.

1) Craigie, Science, **72**, 344, 1930.
2) Met. Zs. **12**, 241, 1895. - Fr. Sauter, Programmabh. Realgymn. Ulm, ca. 1894. - W. Brand: Der Kugelblitz (Hamburg). - Verhandelingen in Accad. Nuovi Lincei, 1908-16. - E. Mathias, Mémorial de l'office nat. météorol. nr. 24, 1935.
3) Vgl. Jensen, Physics, **4**, 372, 1933.
Een goed waargenomen bolbliksem van 15 m middellijn: Onweders **30**, **76**, 1909.

Sterke velden schijnen er in de bolbliksem niet te heersen, want eenmaal ging hij dwars door een bundel telegraafdraden, zonder een spoor van ontlading te vertonen. In een bepaald geval werd een tramdraad gesmolten, hetgeen op een zeer hoge temperatuur wijst; in andere gevallen weer bleek de temperatuur verwonderlijk laag. Het schijnt wel, dat men in dit en in andere opzichten het bestaan van *twee soorten bolbliksems* moet aannemen: die welke zich langs goede geleiders voortbewegen, verblindend helderwit zijn, en waarvan de aanraking brandwonden veroorzaakt en dodelijk is; en die welke vrij in de lucht verschijnen, de geleidende voorwerpen en de mens vermijden, een rode kleur vertonen en veel minder heet zijn.

Soms verdeelt de vuurbol zich in verscheidene kleinere bolletjes, vooral nadat hij een ijzeren voorwerp tot smelten heeft gebracht: er zijn dus bepaalde krachten werkzaam die de bolbliksem telkens opnieuw de bolvorm geven. Bolbliksems graven soms gaten of voren in de grond.

Het zou van belang zijn, iets naders te weten te komen omtrent de beweging der gassen in de vuurbol: wellicht is dit af te leiden uit dwarrelingen in de lichtgevende massa of uit bewegingen van lichte voorwerpen in de buurt. Waren er om de bolbliksem heen nog lichtverschijnselen, elders in de lucht of op de grond bijvoorbeeld? Bij de waarneming is het van groot belang, de afstand tot aan de bolbliksem niet te onderschatten, want anders kan men zich zeer vergissen in zijn afmetingen; het tijdsverloop tussen het verdwijnen van de bol en de knal der ontploffing geeft een betrouwbare schatting voor de afstand.

Niet verwarren tussen een bolbliksem en een meteoorsteen! Een bolbliksem verschijnt niet tenzij bij onweer; verder is de wijze van bewegen geheel anders, terwijl ook de ‘zwavellucht’ kenmerkend is.

Theorieën van de bolbliksem zijn door een aantal geleerden voorgesteld, maar geen enkele kan bevredigend genoemd worden.[1)] Zoveel is wel zeker, dat de vuurbol uit dampkringsgassen bestaat, die op de een of andere wijze tot lichten gebracht zijn. Elke goede beschrijving van het verschijnsel is waardevol. Het is een toetssteen voor een waarnemer of hij, in levensgevaar verkerend, toch nog juist en betrouwbaar kan blijven opmerken en onthouden.

1) Kort geleden heeft Neugebauer de bolbliksem verklaard als een zwerm ionen en vrije elektronen: de quantummechanica toont aan dat zulk een zwerm voldoende stabiel is (Zs.f. Phys. **106**, 474, 1937).

207. Stille ontladingen bij onweer.[1)]

Van verschillende zijden beschrijft men een eigenaardig verschijnsel dat bij zware onweders optreedt: een soort vertikale lichtstrook langs de natte boomstammen op vochtige grond; soms vertoont het zich als een groep kleine lichtbolletjes (1 cm groot). In andere gevallen liepen lichtbollen langs ijzeren hekken, langs telegraafdraden. Deze verschijnselen zijn lichtzwak, alleen in de nacht te zien als een soort luminescentie. We schijnen hier te doen te hebben met een soort Sint Elmusvuur (§ 215), maar misschien met geringere stroomsterkte en hogere spanning.

Ook andere gevallen van stille ontladingen zijn bekend, hoewel ze zeer zelden voorkomen. Soms vormden zich aan de rand van een onweerswolk een paar lichtvlekken of lichtbanden, die een kwartier of een half uur lang licht gaven.[2)] Andere malen zijn het boomtoppen die zacht lichten, of besneeuwde hellingen, of wateroppervlakken.

Ongetwijfeld zou men door aandachtige waarneming wel meer van die belangwekkende gevallen vinden. Het is echter van belang de feiten uiterst zorgvuldig te controleren, daar gezichtsbedrog niet uitgesloten is (Vgl. I, § 227, 231).

208. Ontladingen tussen regendruppels.[3)]

Bij een onweer heeft men eens waargenomen hoe er ontladingen van 5-10 cm lengte tussen de naburige vallende regendruppels ontstonden, telkens nauwkeurig op het ogenblik dat het bliksemde. Als de ontladingen de huid van het gelaat of de handen troffen, voelde men een steek.

Enigszins hiermee te vergelijken is een verschijnsel, door mij eens waargenomen te Jenbach bij Innsbruck: een stoomtreintje reed onder hoogspanningsdraden, en daarbij ontstond een allermerkwaardigste lichtflikkering in de wolk van rook en stoom die het lokomotiefje uitpufte. Het licht flikkerde ongeveer 12 maal per sekunde, wat met de frequentie van de wisselstroom overeenkwam. Het was een verrassend en eerst geheel onbegrijpelijk gezicht! Blijkbaar gingen ontladingen van het ene naar het andere druppeltje over.

1) Süring, Met. Zs. **29**, 389, 1912; **35**, 94, 1918. Samenvatting in Hemel en Dampkring, **16**, 57, 1918-1919. - Oudere waarnemingen in Arago, Oeuvres, **4**, 70.
2) Een dergelijke waarneming in Nederland: Kruisinga, Hemel en Dampkring, **35**, 381, 1937. Eens heb ik zelf zulk een lichtverschijnsel gezien, dat aanhoudend *flikkerde* (ongeveer 3 maal in de sekunde).
3) M.W.R. **31**, 425, 1903.

209. Uitwerkingen van de bliksem.

De bliksem volgt zoveel mogelijk de metalen voorwerpen die hij op zijn weg vindt. Bochten maakt hij zelden, want bij zulk een plotselinge stroomstoot is de zelfinduktie veel belangrijker dan de gewone weerstand, en die wordt juist groot bij zulk een bocht. De geleiders langs dewelke de bliksem loopt, worden door de ontzaglijke stroomsterkte dikwijls tot hoge temperatuur verhit, in talloze gevallen gesmolten wanneer hun weerstand plaatselijk te groot was. Draden van een millimeter diameter smelten geregeld, draden van enkele millimeters dikte slechts bij uitzondering. De schakels van een ketting werden aan elkaar gelast. Soms verdampt een gedeelte van het metaal en slaat op andere voorwerpen in de nabijheid neer: zeer ten onrechte heeft men vroeger iets geheimzinnigs gezien in zulk een 'vervoer door de bliksem', zoals men toen ook neiging had, zich de warmtewerkingen overdreven sterk voor te tellen.

In metalen platen boort de bliksem gaten van een paar cm middellijn. Ruiten worden soms gesmolten of doorboord zonder dat ze barsten; in een bepaald geval had het gaatje een middellijn van 4 mm. Zware balken, muren, stenen worden weggeslingerd.

Soms gaat de ontlading door de telegraafdraden; vogeltjes die op de draad zaten worden op slag gedood, de draden worden verbrijzeld. - Bij het inslaan in de kabel van een tramnet, veroorzaakte de bliksem boogvorming tussen de kern van de kabel en de metalen mantel; de boog brandde zelfs onder water door, en het gevormde knalgas ontplofte verschillende malen![1] - Elektrische geleidingen trekken de bliksem niet aan, maar wanneer ze getroffen worden plant zich naar beide kanten een sterke stroomstoot voort, die gevaarlijk kan zijn. - Twee lichtleidingen, vlak naast elkaar gelegen, hadden bij blikseminslag elkaar zo sterk aangetrokken dat de metalen draden hun isolatiemantels hadden doorgescheurd! Hiervoor moeten ze elkaar hebben aangetrokken met een kracht van 150 kg per cm, wat met 60000 A zou overeenkomen.[2]

Soms ziet men gloeilampen oplichten bij elke bliksem, blijkbaar omdat er telkens een induktiestoot in de leiding ontstaat. In een bepaald geval gaf een lamp een groenblauwe flikkering bij blikseminslag.

Waar de bliksem door vochtig hout gaat, ontmoet hij een

1) Hemel en Dampkring, **19**, 59, 1921.
2) Nat. **128**, 872, 1931.

grote weerstand, en ontwikkelt plotseling zoveel warmte, dat het water verdampt en het hout in splinters uiteen vliegt; vandaar ook dat zo dikwijls de dakpannen van de balken weggeslingerd worden. Spijkers worden uit de muur gerukt of liever weggedrukt, omdat de sporen van vochtigheid onder hun koppen in stoom overgaan.

Allermerkwaardigst en ongelofelijk zijn de oude verhalen over een harsachtige, bruine, brandbare stof die soms na blikseminslag op de grond en de naburige voorwerpen te vinden zou zijn. Er zijn zoveel dergelijke waarnemingen overgeleverd, dat men zich werkelijk gaat afvragen of men die allemaal als produkt der verbeelding moet beschouwen ....

210. Bliksembuizen, fulgurieten.

Vochtige grond geleidt de bliksem vrij goed. Daarentegen ontmoet deze in droge grond een grote weerstand, zodat hij een aanzienlijke hitte ontwikkelt. In lichte leemgrond vond men een gat van 60 cm diepte, boven 16 cm breed, op 30 cm diepte reeds vernauwd tot 5 cm. In zandgrond wordt de wand van zulk een buis soms tezamengesmolten tot een glasachtige laag, die eigenlijk kwarts is: men kan er glas mee krassen. De buitenwand is bedekt met hobbeltjes en oneffenheden. Waar het zand zuiver is zijn dergelijke ‘bliksembuizen’ mooi blank, maar meestal is de kleur gewijzigd door humus of verontreinigingen. Men kent bliksembuizen die tot 10 m lang waren, meestal enkelvoudig, soms vertakt; het uiteinde vertoont enkele uitsteeksels in de vorm van horentjes, maar de wand blijft overal een gesloten geheel vormen zonder openingen.[1)]

De bekende Amerikaanse natuurkundige Wood vertelt, hoe hij eens de bliksem dicht bij zich zag inslaan, en de inslagplaats terug kon vinden doordat het gras daar beschadigd was; hij ontdekte er bij goed zoeken twee gaten van 2,5 cm en van 0,6 cm middellijn. De aarde was zeer nat; Wood smolt enige kilogrammen soldeer in een ijzeren pan, goot het gesmolten metaal in de openingen en kon dan gemakkelijk de bliksembuizen in hun geheel uitgraven. Ze waren meer dan een meter lang, verbonden door een dwarsbuis en hier en daar vertakt. De wand bestond uit witte zandkorrels die klaarblijkelijk aaneengesmolten waren, aan de buitenkant waren ze bedekt met kleine knopjes

1) Americ. Journ. of Sc. **8**, 17, 1899.

en lijsten. De buizen waren min of meer onregelmatig kurkertrekkervormig gewonden.
Deze merkwaardige vormingen heb ik wel eens door toeval in zandverstuivingen bij Soest gevonden, zij het dan van kleinere afmeting en niet als geheel bewaard.

211. Magnetisering door de bliksem.[1]

Als men te weten komt waar een bliksem is ingeslagen, moet men er altijd op uit gaan om de sporen van de ontlading nader te onderzoeken. Tot het merkwaardigste wat men daarbij beleven kan, behoort het ontdekken van magnetisch geworden voorwerpen in de buurt

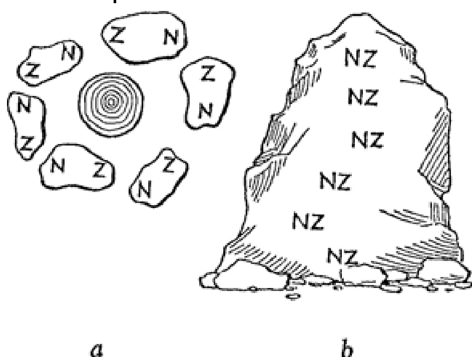


Fig. 92. Magnetisering van rotsblokken in de buurt van een bliksembaan. *a*. rotsen om een boom; *b*. bliksemspoor langs een groot rotsblok.

van de bliksembaan; een eenvoudig zakkompasje is voldoende om die op te sporen.
In een bepaald geval had de bliksem een boom in een park getroffen; al de gietijzeren paaltjes van de afrastering waren magnetisch geworden. In een huis waar de bliksem was ingeslagen waren allerlei stalen voorwerpen gemagnetiseerd.[2] Tracht door vergelijking met gelijksoortige, verder verwijderde voorwerpen met zekerheid uit te maken dat dit geen werkingen zijn van het normale magnetische aardveld (§ 192), maar wel van de bliksemontlading.
In gebergten waar ijzerhoudende gesteenten voorkomen, treft de bliksem soms een boom of een rotspunt die toevallig omringd is door blokken bazalt, fonoliet, doleriet. Met ons kompasje vinden we dan, dat deze rotsblokken een Noord- en een Zuidpool hebben gekregen; die polen liggen in ringen om de bliksembaan, zoals krachtlijnen van ijzervijlsel om een stroom-

1) Met. Zs. **18**, 481, 1901.
2) Ann. d. Phys. **140**. 656, 1871.

geleider (fig. 92*a*). - Over de oppervlakte van basaltrotsen glijdt de bliksem onder achterlating van een sterk magnetisch spoor (fig. 92*b*); aan de ene zijde van de stroombaan is het gesteente Noord-magnetisch, aan de andere Zuid-magnetisch: de naald van ons kompasje draait soms 180° bij verplaatsing over slechts enkele cm. Helaas zijn veel rotstoppen reeds herhaaldelijk getroffen zodat de sporen talrijk en verward geworden zijn. Uit de ligging van die N- en Z-polen is onmiddellijk af te leiden of de bliksem van de wolk naar de Aarde stroomde of van de Aarde naar de wolk. Beide gevallen komen voor, het tweede het veelvuldigst: de 'stroom' gaat van de Aarde naar de wolk, dus de elektronen van de wolk naar de Aarde. Deze bevinding is in de laatste jaren langs geheel andere weg met behulp der nieuwere technische hulpmiddelen bevestigd (§ 195).

Het zou de moeite waard zijn, naar remanent magnetisme te zoeken bij bakstenen muren in de buurt van bliksemafleiders waar de bliksem ingeslagen heeft; want bakstenen zijn ook ijzerhoudend. In een bepaald geval kon men inderdaad hun magnetisme bemerken, hoewel de bliksemsfleider op 10 tot 20 cm afstand van de muur liep.[1)]

De sterkte van het magnetisme der bazaltstukken om een bliksembaan hangt alleen af van *de grootste stroomsterkte*, die gedurende ontlading is voorgekomen (niet van de gemiddelde!). Pockels koos een der sterkst magnetische stukjes, schatte de afstand *R* waarop het van de bliksembaan verwijderd was, en hakte er nu met hamer en beitel een staafje uit, gericht volgens de magnetische as. Hiervan bepaalde hij het magnetisch moment met een magnetometer, en zocht daarna welk een stroom hij door een spoel moest leiden om hetzelfde magnetische moment in een daarin geschoven staafje bazalt teweeg te brengen. De stroomsterkte van de bliksem is dan ongeveer $\pi \times n \times R/r$ maal groter geweest (wanneer n = aantal windingen van de spoel, r = straal van de spoel, R = afstand van 't bazaltstukje tot de bliksembaan). Zo werd de stroomsterkte van de bliksem gemeten (§ 195). De N.V. Kema te Arnhem gebruikt thans stalen staafjes met sterk remanent magnetisme, die aan hoogspanningsleidingen worden bevestigd, en die later door hun magnetisme de sterkte van de bliksemstroom aangeven als die in hun buurt is voorbijgegaan.

Verhalen over de inwerking van de bliksem op scheepskompassen komen veelvuldig voor in alle avonturenromans[2)]: men beweert, dat bij een hevige bliksem Noord- en Zuidpool van de naald van plaats kunnen omwisselen. - Juist is, dat in bepaalde gevallen het scheepskompas bij bliksemontlading grote schom-

1) G. Platania, Nat. **98**, 209, 1916. - C.R. **141**, 974, 1905.
2) Bijvoorbeeld in Jules Verne: Voyage au Centre de la Terre.

melingen maakte, waarna het tot zijn normale stand of in de buurt daarvan terugkeerde.[1)] Blijkbaar is dit de normale verplaatsing van een magneet in het veld van een stroom; tevens worden ijzeren kabels en andere ijzeren onderdelen van het schip in het veld van de bliksem magnetisch, ten dele zelfs blijvend magnetisch, zodat het kompas dan bestendig mis wijst. Het is misschien denkbaar dat de bliksem ook een enkele maal zo sterk op de naald gewerkt heeft, dat deze blijvend omgepoold werd.

212. De uitwerking van de bliksem op levende wezens.

Lange tijd heeft men beweerd dat de kans op het treffen van populieren en wilgen vooral, maar ook van eiken, sparren, iepen veel groter was dan die van de beuken. Men schreef dit toe aan verschillen in de elektrische weerstand van het hout.[2)] Thans is vrijwel uitgemaakt, dat de *kans op blikseminslag* voor [...] deze soorten bomen even groot is, maar *de uitwerking* is veel heftiger bij de eerste dan bij de tweede groep.[3)] Want bij bomen met gladde schors vormt de regen waterstroompjes die de bliksem weggeleiden; terwijl bij de andere samenhangende waterdraadjes ontbreken, zodat de bliksem tot het cambium doordringt, daar een grote hitte ontwikkelt, het water doet verdampen en de schors doet afsplijten. Men kan deze opvatting staven, door bij beginnende regen op te nemen hoeveel tijd er nodig is eer de regen de schors voldoende bevochtigt om er af te vloeien; men merkt op dat er nog geen water vloeit langs de sparren, terwijl de beuken al zeer merkbare hoeveelheden afvoeren.

Het gevaar van blikseminslag is niet groter in een bos dan daarnaast. Slaat de bliksem in, dan wordt hij bijna altijd langs een boomstam weggeleid. Er is dus geen reden om bij onweer het bos te vermijden, maar men stelle zich nooit dicht bij de stam, onder welke soort boom men ook moge schuilen. Wel blijft waar, dat de trefkans groter is bij vrijstaande bomen of bomen die boven hun buren uitsteken; misschien is zij ook

1) Arago, Oeuvres, **4**, 128 en volgende. - Terrestrial Magnetism, **14**, 103, 1909. - Enz.
2) Voor een eenvoudige manier om de weerstand van bomen te bepalen, als men maar over een galvanometer beschikt, zie Phys. Zs. **6**, 835, 1905.
3) Oudere litteratuur in: Van Everdingen, Hemel en Dampkring, **5**, 17, 1907. - E. Stahl: die Blitzgefährdung der verschiedenen Baumarten (Jena, 1912). - Walter, Phys. Zs. **33**, 306, 1932.

groter voor bomen op vochtige (= goed geleidende) grond. Dat dorre bomen de bliksem in hoge mate zouden aantrekken is een zeer onwaarschijnlijk verhaaltje.[1)]

Zoals wij reeds hebben uiteengezet, wordt de bliksem meestal het best geleid door het cambium en de dunne laag vochtig splinthout vlak onder de schors, en verhit hij dit zo dat het water in stoom overgaat en de boom letterlijk ontploft. De schors wordt geheel of gedeeltelijk afgerukt, soms in een schroefvormige strook, van onder tot boven om de stam. Het hout wordt gekloven tot splinters en vezels, uiteengerafeld en weggeblazen, uitgedroogd of gezengd; in een bepaald geval was het hout van een populier 's anderendaags dieprood geworden.[1)] Waar de bliksem in de grond verdwenen is ziet men opgewoelde aarde en een gat als van een stok.

Het is merkwaardig dat soms verscheidene bomen bij één enkele blikseminslag getroffen worden;[2)] in een bepaald geval waren het 72 oude sparrebomen tegelijk! Dit wijst op vertakking van de bliksembaan naar de aarde toe, zoals we dat ook uit de foto's kennen.

Weinig is bekend over bliksemschade aan kruidachtige planten. Tabak, bieten, rapen, aardappelplanten kunnen gedood worden. Bij deze laatste is de inslagplaats te herkennen aan ronde vlekken van enige meters middellijn, waar de planten wit geworden zijn; die in het midden zijn al dood, die aan de randen kunnen nog weken lang leven. - Slaat de bliksem in een korenveld, dan vindt men de aren dikwijls geknakt, uitgespreid in de richting van de bliksembaan. - In een onbebouwd veld, met distels bedekt, waren deze planten getroffen over een oppervlak van 18 m middellijn.[3)] - In een veld met jonge bonenplanten was al het gewas geknakt in een kring van 10 m middellijn; in een kringetje van 0,50 m in het midden was de aarde omgewoeld en waren de planten geblakerd en verzengd.[4)]

Men heeft beweerd dat de bliksem die in de nabijheid van een. hoenderhok inslaat de eieren doodt door zijn felle ultraviolette straling(?). Aan dezelfde oorzaak heeft men willen toeschrijven dat in de buurt van een boom die getroffen wordt dikwijls verscheiden andere aan 't kwijnen gaan, verspreid over een *halve*

1) Schr. naturf. Ges. Dantzig, **10**, 149, 1902.
1) Schr. naturf. Ges. Dantzig, **10**, 149, 1902.
2) L. Häpke, Abh. naturw. Ver. Bremen, **14**, 145, 1897.
3) Arago. Oeuvres, XI, blz. 638.
4) Hemel en Dampkring, **6**, 26, 1908.

cirkel met een straal van de orde van 20 m: de getroffen boom zou zelf schaduw werpen.[1)]

Wanneer mensen door de bliksem getroffen worden, vindt men soms dat het lichaam werkelijk beschadigd is (verbrand, gekwetst); andere malen zijn mensen gedood zonder dat er iets aan de lijken waar te nemen valt: sommigen vermoeden dat het hart van schrik verlamd is op het ogenblik dat de bliksem vlak bij de slachtoffers insloeg. - Ziehier enkele merkwaardige gevallen, zo gekozen dat voor elk geval een aantal voorbeelden te geven zouden zijn.

Persoon op slag gedood, blijft onbeweeglijk in dezelfde stand die hij op dit ogenblik innam.

Persoon dodelijk getroffen, kleren en schoenen verscheurd en in alle richtingen verspreid.

Persoon dodelijk getroffen, huid verbrand, kleren onbeschadigd.

Persoon ongedeerd, kleren vernield, schoenen weggeslingerd.

De getroffen persoon is onthaard: hoofdhaar, baard, haren van de huid verdwenen. Voorwerpen die de getroffene in de hand hield zijn weggeslingerd.

De personen die door de bliksem getroffen zijn en die later weer bijkomen, herinneren zich niets meer van het gevaar dat ze gelopen hebben; blijkbaar is de ontlading uiterst kort van duur. De getroffenen gaan soms lijden aan katarakt (= troebeling van de lens en andere gezichtsstoringen); men zoekt daarvan de oorzaak in bepaalde elektrolytische werkingen van de stroom in het oog, waardoor cellen sterven en bloedsaandrang ontstaat.[2)]

Op het lichaam van personen die door de bliksem getroffen zijn vertonen zich soms grillig gevormde figuren, vertakt als het blad van een varen, waarin de verbeelding van het volk een soort fotografie heeft gezocht van de omringende voorwerpen![3)] Ook zonder deze sprookjes is het verschijnsel merkwaardig genoeg: het is geen verbranding, de kleine haartjes zijn niet eens verzengd; men denkt veeleer dat de ontlading, zich aan de oppervlakte van het lichaam vertakkend zoals bij de proeven van Lichtenberger, een plaatselijke verlamming en verwijding van de bloedvaten veroorzaakt, waarin het bloed zich uitstort.

Het volksgeloof, dat men bij onweer niet hard zou mogen lopen of zich in de tocht bevinden, uit vrees dat de bliksem

1) C.R. **192**, 390, 1931.
2) Arch. f. Ophth. **50**, 1, 1900.
3) Sc. Americ. **108**, 576, 1913. - Met. Zs. **35**, 193, 1918.

daardoor ‘aangetrokken’ wordt, is van elke grond ontbloot. - Lange tijd heeft men getracht de bliksem af te wenden door de kerkklokken te luiden; later dacht men integendeel dat het luiden van de klokken bij onweer een gevaarlijk gebruik was! We weten thans wel, dat het klokkegeluid op zichzelf geen invloed heeft; maar hoge torens worden vanzelf meer getroffen dan woonhuizen, en het klokketouw zal de rol van geleider spelen als de bliksemafleider ontbreekt.

Is het waar dat de bliksem nooit op een trein inslaat? Waarom?[1)]

213. Plaatsen waar de bliksem gewoonlijk inslaat.

Er zijn plaatsen waar blikseminslag keer op keer voorkomt. Het is uiterst belangwekkend dergelijke punten op te sporen en te onderzoeken! Het zijn volstrekt niet altijd de hoogste punten van het terrein; belangrijker dan de hoogte is de geologische aard van de grond. Het schijnt wel dat de lucht op deze plaatsen sterker geleidend is dan normaal, en die ionisatie zou toe te schrijven zijn aan een hoog gehalte aan radioaktieve delfstoffen in de bodem; maar daarnaast kan het geleidingsvermogen enz. een rol spelen. In Nederland zijn de streken die het veelvuldigst getroffen worden: oostelijk Zeeland en de Gelderse Achterhoek.[2)]

214. De bliksemafleider.[3)]

Aangezien de elektrische velden in de dampkring zoveel sterker zijn tussen twee wolken dan tussen een wolk en de aarde, is het uitgesloten dat bliksemafleiders door de werking hunner spitsen de wolken zouden ontladen. Slechts als de bliksem de aarde bijna bereikt heeft, kunnen ze hem een gemakkelijke weg bieden, en aldus de kans op inslag wellicht een weinig kleiner maken; plotselinge afwijkingen van de bliksembaan in de richting naar torenspitsen toe zijn inderdaad rechtstreeks waargenomen.[4)]

Het werkelijke nut der bliksemafleiders bestaat echter in het verminderen van de kans op brand en op levensgevaar voor de bewoners ingeval de bliksem inslaat; de kans op brand wordt tot minder dan 1/10 teruggebracht. Hoge opstaande stangen hebben geen zin en zijn duur; doelmatiger zijn korte stangen, en

1) F. Priess, Abh. naturw. Ver. Bremen, **14**, 217, 1897.
2) W. Bleeker, Hemel en Dampkring, **34**, 428, 1936.
3) Hoofdcommissie voor de Normalisatie, Ontwerp-voorschrift voor aanleg van bliksemafleider-installaties, V 1014.
4) B. Walter, Zs. f. techn. Phys. **18**, 105, 1937.

een aantal geleiders die het huis als met een 'kooi van Faraday' omspannen. De afleiders moeten zo recht mogelijk zijn; want de bliksem is een zo plotselinge stroomstoot, dat elke bocht hem tengevolge van de zelf-induktie een bijna onoverkomelijke weerstand biedt: nog liever springt hij over een luchtinterval van de ene geleider naar de andere over. Bij rieten daken wordt de afleider altijd op enige afstand van het riet bevestigd, zodat geen brand kan ontstaan ook al bezwijkt de draad door te hoge stroomsterkte.

Tegen bolbliksems helpen bliksemafleiders niet.[1)]

Onderzoek de plaatsen waar bliksem is ingeslagen, neem de schade op, kijk of er een bliksemafleider was en zoek overal sporen van de inslag.

215. Sint Elmusvuur.

Een beroemd verschijnsel[2)], met een zekere mystiek omkleed, vrij zelden in ons vlakke land waar te nemen, maar wel af en toe op zee; aan boord van onze lichtschepen wordt het elk jaar een aantal keren opgemerkt. Men ziet het alleen 's nachts, in de regel bij onweders, sneeuw- of hagelval, of even daarna. Op hoge stangen, masten, molenwieken, windvanen, torenspitsen, bliksemafleiders, op struiken of ook op mensen (snor, haren, kleren) verschijnen bleke, bevende vlammetjes, onheilspellend in de donkere onweersnacht; éénmaal slechts schijnt het waargenomen op de toppen der golven van de zee (door 'l'Impératrice Eugénie' in 1869); soms verschijnt het gedurende enkele ogenblikken op een gebouw, dat onmiddellijk daarna door de bliksem getroffen wordt (op de kerktoren te Tjummarum in 1898). Dikwijls is het vergezeld van een merkwaardig zoemend geruis. Bij dag kan men het St. Elmusvuur niet zien, men merkt alleen het gesis en het zachte knetteren der bliksemafleiders als het windstil is. De aanraking schijnt een lichte pijn te veroorzaken. Het verschijnsel duurt dikwijls slechts enkele minuten.

Het St. Elmusvuur is een echte *glimontlading*, die ontstaan kan als het lucht-elektrische veld een bedrag van enige tienduizenden Volt per cm bereikt. Zolang de stroomsterkte van de orde 10^{-4} A/cm^2 is, ziet men slechts een gelijkmatig lichthuidje dat de spitse punten overdekt; neemt de stroomsterkte toe, dan ontstaan

1) E. Mathias, C.R. **188**, 1355, 1929.
2) De naam schijnt verband te houden met Hermes, de god aan wien de Grieken meestal dit verschijnsel toeschreven (Zs. f. Met. **19**, 499).

lichtbundeltjes van 10^{-4} A tot 10^{-3} A ieder. Soms is de aarde de + elektrode, soms de - elektrode; de andere elektrode moet men denken in de geladen luchtlagen. De bundels die zich aan de + zijde vormen hebben een roodachtig-witte steel, die zich vertakt in fijne stralen, violet aan hun uiteinde; zij omvatten een hoek van meestal meer dan 90° en zijn 1 tot 10 cm lang. De blauwachtige bundels aan de - pool hebben geen eigenlijke steel; een lichtpuntje draagt een lichtschijn, die zich geleidelijk tot een openinghoek van slechts ongeveer 45° verwijdt, en minder dan 1 cm lang is (fig. 93). Het zijn dezelfde lichtbundeltjes als die welke men in 't laboratorium op een elektriseermachine in de duisternis ziet ontstaan. Dikwijls verandert het St. Elmusvuur

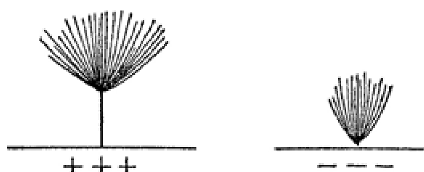


Fig. 93. St. Elmusvuur. Links de positieve, rechts de negatieve ontladingsvorm.

in korte tijd verscheiden malen van teken. Op de kleren ziet men de + bundeltjes als de haartjes van een pels; in de diepte der plooien zijn ze korter, op de naar buiten konvexe krommingen zijn ze langer: blijkbaar hangt de lengte af van het plaatselijke spanningsverval. De - bundeltjes doen zich voor als een onrustig licht, met hier en daar donkere vlekken.

Het is een leuke proef, de vinger boven de spits van een bliksemafleider te houden en op te merken hoe het vlammetje, dat er op zat, op de vingertop overwipt! Let op hoe het *precies* gebeurt: als de vinger boven de stang is, dooft het vlammetje uit, en een ander verschijnt op de vinger, zodra die tenminste 2 cm boven de spits gehouden wordt. Blijkbaar is het spanningsverval maar sterk genoeg op de verst uitstekende voorwerpen, en neemt nu de vinger de rol van de spits over.

Evenzo wordt vermeld, dat een waarnemer die St. Elmusvuur aan de punten van zijn snor opmerkte, het licht zag uitdoven zodra hij in de nabijheid van huizen of onder bomen liep: hij behoorde dan niet meer tot de vooruitspringende delen van het aardoppervlak!





PLAAT XVI.
Poollicht.
Boven: diffuse lichtschijn en stralenbundels; bemerk enkele beelden van heldere sterren.
Opname van de Nederlandse Pooljaarexpeditie te Angmagsalik, 1936.
Beneden: lichtboog aan de noordelijke horizon, met donker segment.
Naar F. Störmer, Atlas of Auroral Forms, fig. 2.

216. Het Poollicht of Noorderlicht (Plaat XVI).[1)]

Een brandstee diep verholen stond
in 's noordens allerdiepsten grond,
die straten licht hervoorwaarts zond,
tot boven onze hoofden.

G. Gezelle, Tijdkrans (Het Noordvier).

Theet een viervlaghe, op zijn dietsch,
ofte noordscijn, soo 't bediet.

G. Gezelle, Liederen enz. (Die Viervlaghe).
Zie ook: R. Browning, Easter-day, XV en XVII.

In onze streken is er gemiddeld ongeveer 4 maal 's jaars noorderlicht te zien, maar in gunstige jaren wordt het wel 10 maal en meer waargenomen. De verschijnselen duren dikwijls maar een uur of twee, zijn onzichtbaar als het bewolkt is of als de maan schijnt, of te midden der straatverlichting van de stad; en dan moet het nog lukken dat men net op zulk een gunstig ogenblik buiten is en rondkijkt en oplet .... Voorwaar, het is niet verwonderlijk dat veel mensen nooit het poollicht gezien hebben! - Reden te meer om zich vooruit voor te stellen hoe het zich voordoet; dan zal men het althans minder licht over 't hoofd zien. De meeste kans heeft men als er grote zonnevlekken in 't midden der zonneschijf staan, dus omstreeks de jaren 1938, 1949, 1960, die vermoedelijk maxima van zonne-aktiviteit brengen.

1. Zwakke lichtschijn zonder bepaalde vorm, ongeveer even helder als de melkweg, gemakkelijk te verwarren met het licht van verre steden of van de maan. Sommige nachten zijn veel helderder dan andere, ook al is er geen maan; de hele lucht schijnt dan licht te geven.
2. Lichtschijn in de vorm van wolken of rook; gelijkt soms op lichtgevende cirruswolken, lichtbanden of lichtplaten. Blauwachtig of bleekgeelgroen licht; het flikkert onregelmatig, b.v. 2 of 3 maal per sekunde, dan enkele sekunden rust, dan weer; in andere gevallen pulsaties met een periode van 10 tot 30 sec.
3. Lichtende bogen, meestal enige graden breed, groengeel, soms verscheidene boven elkaar. Meestal is er aan de noordelijke gezichtseinder een donker segment, omringd door de boog, die naar onder toe scherp begrensd is, naar boven toe wazig

1) Vegard, Hdb. d. Experim. Physik, **25**, 385, 1928. - Hewson, Rev. of Modern Phys. **9**, 403, 1937. - Een goede beschrijving van bogen in onze streken: Phys. Zs. **9**, 675, 1908; verder in: Onweders, enz.

uitloopt. Soms ziet men de lichtbogen uit het donkere segment opstijgen en uitdoven vóór ze 't zenith bereiken. Nauwkeuriger onderzoek bewijst dat het midden van donker segment en lichte bogen niet het eigenlijke Noorden is, maar het magnetische Noorden.

4. Pulserende banden. Dit zijn bogen die uit verschillende evenwijdige banden bestaan, met donkere tussenruimten. Men ziet er lichtgolven over lopen, meestal van West naar Oost, met een snelheid van b.v. 20° per sec.
5. Draperievormige bogen, opgebouwd uit evenwijdige stralen die loodrecht op de boog lopen. De onderste grens is scherp, soms dieprood. Deze bogen bewegen als slangen, er lopen plooien over. Soms zijn er verscheidene bogen tegelijk.
6. Stralen zonder boog. Als zoeklichtbundels die van de gezichteinder opstijgen, langer worden, zich verplaatsen, zich weer intrekken, 'spelen', 'dansen'. Ze zijn dikwijls gecombineerd met andere noorderlichtvormen.
7. Draperieën, als gordijnen in voortdurende golving, zeer dun, duidelijk opgebouwd uit evenwijdige stralen; ze zijn onderaan meestal helder en scherp begrensd, boven waziger. Zeer zeldzaam bij ons.
8. De noorderlichtkroon: talloze evenwijdige stralen die perspektivisch schijnen uit te stralen van één punt hoog aan de hemel, dikwijls met schitterende kleurverschijnselen. Komt bij ons haast nooit voor.

De kleur dezer lichtverschijnselen is meestal 'spookachtig' groenig, zwavelgeel, de zwakste stralen soms blauwachtig; bij sterke noorderlichten verschijnen ook dieprood of groen, rood vooral aan de ondereinden (anderen zeggen: in de richting naar dewelke de bundels groeien).[1)] De totale lichtsterkte is meestal kleiner dan die der maan in het eerste kwartier; vergelijk de zichtbaarheid van voorwerpen op afstand bij noorderlicht met die bij verschillende maanstanden en maanhoogten.

Er wordt beweerd dat het fonkelen der sterren bij poollicht toeneemt: dit lijkt zeer onwaarschijnlijk, maar zou belangwekkend zijn. Niet minder merkwaardig zou het zijn als de oudere waarnemers eens gelijk krijgen, die beweren dat het poollicht een merkbare absorptie van het sterrelicht uitoefent,[2)] en dat het

1) Voor een kleurrijk noorderlicht in Nederland, zie bv. Hemel en Dampkring, **27**, 199, 1929.
2) Phys. Zs. **9**, 675, 1909.

dikwijls gevolgd wordt door ijle cirrusluiers, die men kan zien zodra de dag aanbreekt. Verklaren die sluiers dan de lichtverzwakking?

Twijfelachtig is lange tijd geweest, of er bij sterk poollicht ook enig geruis te horen is, zoals het volksgeloof bericht: ‘als ruisen van zijde, of als meel dat gezeefd wordt, of als de stormwind die in de takelage fluit.’ Er zou hier een grond van waarheid aanwezig kunnen zijn; men luistere echter bij kalm weder, ver van bomen, water en steden, en houde rekening met het ruisen der oren (§ 57)! Het is dan nog de vraag of het geluid niet te wijten is aan het uitstromen van elektrostatische ladingen uit naburige spitse voorwerpen, en dus misschien slechts op indirekte wijze met het poollicht samenhangt.

Voor de meeste landen van ons halfrond vertonen zich de lichtverschijnselen aan de noordzijde van de hemel, meestal vrij nauwkeurig in de richting van de magnetische pool. De vormen wisselen voortdurend, soms sneller, soms langzamer. Die eigenaardige rusteloosheid, de ijlheid hunner stralingen, waar men de sterren ongestoord door heen ziet schijnen, maken een onvergetelijke indruk: het is, alsof iets bovenaards naar ons toe kwam. - En waarlijk! De moderne theorie heeft ons geleerd, dat de oorsprong van het poollicht te zoeken is in stromen zeer ijl gas, uitgezonden door de zon, voor een groot gedeelte geioniseerd in positieve en negatieve ionen, zich krommend in het magneetveld der Aarde en haar nabij de polen treffend. Vandaar dat zij ons ook in de nacht kunnen bereiken, terwijl lichtstralen rechtlijnig bewegen en alleen de dagkant der Aarde zouden treffen.

De hoogte van tal van poollichten is bepaald door fotograferen van uit twee verschillende waarnemingsplaatsen: ze blijkt vrij geregeld omstreeks 100 km te liggen, al zijn allerlei hoogten van 60 tot 300 km gevonden. Poollichten boven 300 km en tot 1000 km toe, met een merkwaardige paarsgrijze tint, die zeer zelden voorkomen, zijn gebleken altijd te ontstaan in lagen van de dampkring welke nog *rechtstreeks door de zon beschenen* worden; ze hebben dus een ietwat ander karakter dan de lagere, ‘eigenlijke’ poollichten. Sommigen beweren dat de poollichten die we in landen zoals Nederland waarnemen, te wijten zijn aan storingen in het aardmagnetische veld, waardoor de elektronenbundels van hun normale weg zijn gaan afwijken en buiten het poolgebied terechtgekomen zijn. De ware richting der poollichtbundels in de ruimte is vrijwel precies evenwijdig aan de

magnetische krachtlijnen der Aarde, en hun schijnbare convergentie naar een punt onder de horizon is aan perspektief te wijten; de bogen wijken echter dikwijls *sterk* af van de magnetische parallelcirkels.

Het spektrum van het poollicht is een bandenspektrum van stikstof, met daarenboven enkele afzonderlijke zuurstoflijnen; van deze laatste is de groene noorderlichtlijn 5577 de belangrijkste. Van lichte gassen zoals helium en waterstof vindt men geen spoor. Hierdoor wordt de onderstelling bevestigd, dat de stratosfeer niet veel in samenstelling verschillen kan van de diepere lagen van de dampkring; de abnormale geluidsvoortplanting is dus alleen te verklaren door hoge temperaturen in de stratosfeer aan te nemen (§ 15).

Nog in ons aller herinnering is het prachtige poollicht, dat zich in de nacht van 25 tot 26 Januari 1938 over heel Nederland vertoonde, en dat ook over een groot gedeelte van Europa te zien is geweest.[1)] Niet alleen was het een opvallend helder verschijnsel, maar het trok nog bijzonder de aandacht door de ongewone rode kleur, die naast het vaalgeel en lichtpaars voorkwam en veelal zelfs overheerste. Er vertoonden zich op verscheiden plaatsen van de hemel diffuse lichtwolken, met wisselende stralenbundels die er doorheen schoten; af en toe draperieachtige strukturen; aan de noordelijke kim zag men een ontzaglijke vaalgele boog, op sommige plaatsen zelfs een dubbele boog, waaruit stralenbundels opschoten. Af en toe vlagen van licht, die van de horizon naar het zenith golfden. Een voortdurende wisseling van zachte kleuren en vormen, die zich in diepe stilte afspeelde. Plaat XVI vertoont dergelijke lichtverschijnselen.

In het spektrum vertoonden zich, buiten de stikstofbanden, nog de groene en de rode zuurstoflijnen.

Het verschijnsel ging gepaard met magnetische stormen en storingen in het telegrafisch verkeer, zo sterk als sedert 1921 in de Bilt niet meer waren opgetekend.

217. Het aardlicht.[2)]

Ver van steden en dorpen, midden in de nacht, als er geen maan is en de zon al meer dan 18° onder de gezichteinder staat, turen we naar het donkere hemelgewelf met al zijn sterren. De

1) Hemel en Dampkring, **36**, 89, 1938.
2) G. Déjardin, Rev. of Modern Physics, **8**, 1, 1936.

hemel is zeer merkbaar helder; neem een stuk stevig, matzwart papier, maak er een gaatje in en houd het op enige afstand van uw oog met de hemel als achtergrond; het gaatje is duidelijk minder donker dan het omringende scherm, vooral wanneer u in dit laatste een knik maakt, zodat het geen bestraling van boven kan krijgen. - U zoudt kunnen denken dat dit licht is van al de sterren tezamen, en wel vooral van de talloze zeer zwakke sterren die men niet één voor één kan onderscheiden. Maar dit is niet zo! Zulk sterrelicht zou nabij de gezichteinder merkbaar zwakker moeten worden, tengevolge van de toenemende lichtverzwakking door de dampkring (I, § 46). We zien daarentegen, dat de lichtschijn op 45° hoogte nog nauwelijks waar te nemen is, 20° boven de kim al duidelijk lichter wordt, op 15° het helderst is, en dat hij zich tot de horizon voortzet. De oppervlakte-helderheid van dit *aardlicht* is meestal zwakker dan die van de melkweg, maar toch veranderlijk van nacht tot nacht. Soms is het 's nachts zo licht, dat men een telegraafpaal op 100 m kan zien, zijn horloge kan aflezen en grote drukletters onderscheiden, terwijl de melkweg haast onzichbaar is geworden. De eenvoudigste manier om de helderheid van de nachtelijke hemel te bepalen, is het waarnemen van de zwakste sterretjes die in een gegeven sterrebeeld nog net te onderscheiden zijn; door opzoeken in een ster-atlas vindt men dan hun grootteklasse.

De toenemende helderheid van het aardlicht tot dicht bij de gezichteinder bewijst, dat het de lucht zelf is die licht geeft: bij de kim kijken we door een dikkere laag. Het aardlicht moet een soort zwak, diffuus noorderlicht zijn, want spektroskopisch heeft men er de groene noorderlichtlijn in gevonden. Maar in andere opzichten zijn de spektra verschillend; en even zeldzaam als het eigenlijke, plaatselijke noorderlicht voorkomt, even gewoon en algemeen is het aardlicht. En zo zien we weer dat een der meest alledaagse verschijnselen die we in 't vrije veld kunnen waarnemen, ons op het spoor brengt van buitengewoon belangwekkende en nog weinig bekende kosmische processen.

218. Het meten van hoeken in 't vrije veld[1].

a. Schat eens de hoogten van sterren zonder enig hulpmiddel.[2] Bepaal daartoe eerst het *zenith*; keer u om, en zie of u het dan nog op dezelfde plaats zoudt aanwijzen. Bepaal nu de hoogte 45°, dan 22_5° en 67_5°, enz. Er is een neiging om het hoofd niet

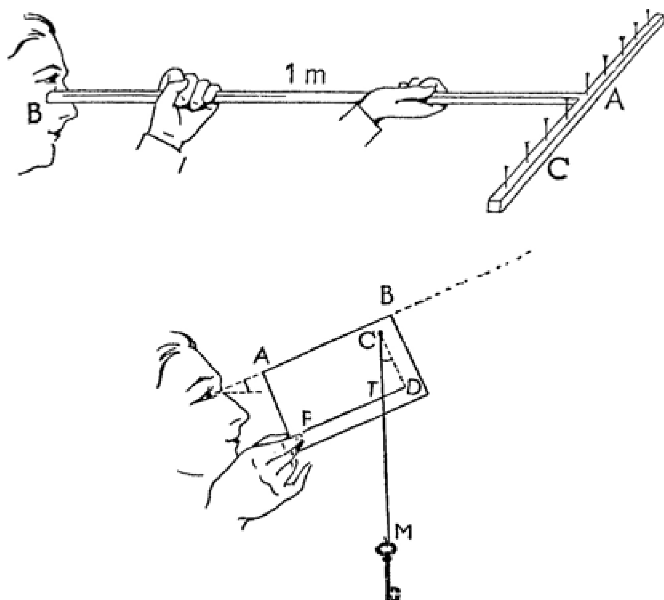


Fig. 94. Eenvoudige hulpmiddelen voor het schatten van hoeken.

genoeg achterover te buigen. Een *goed* waarnemer maakt geen fouten groter dan 3°.

b. Prik drie spelden A, B, C in een plankje of in een briefkaart, zò dat de gezichtslijnen BA, BC de te meten hoek afbakenen. Het plankje moet vast opgesteld zijn, op een tafel liggen of tegen een boom gespijkerd zijn. Trek daarna de lijnen BA, BC, en meet hun hoek met een gradenboog.

c. Twee latten, de ene van 1 meter lengte, de andere loodrecht daarop bevestigd; in deze laatste, spijkers of spelden op vaste

1) Deze enkele aanwijzingen zijn ongewijzigd overgedrukt uit deel I, om deel II geheel zelfstandig bruikbaar te maken.

2) A.A. Nijland, A.N. **160**, 258, 1902.

afstanden van elkaar (fig. 94). Houd deze soort hark met de steel B tegen uw jukbeen gedrukt; als nu de spijkers A en C met de twee beschouwde punten schijnen samen te vallen, is AC/BA de gevraagde hoek in 'radialen'. Eén radiaal = 57°. Als b.v. AC = 7 cm, is AC/BA = 0,07 rad. = 4°. We zien de zonneschijf en de volle maan onder een hoek van 1/108 rad.

d. We strekken de arm recht vóór ons uit en spreiden de vingers van de hand zo ver mogelijk uiteen; dan ziet ons oog tussen de top van de duim en van de pink een hoek van ongeveer 20°. Houd met gestrekte arm een latje loodrecht op uw blikrichting, en meet (in cm) hoe groot de afstand *a* schijnt te zijn tussen de twee beschouwde punten: de hoek bedraagt dan ongeveer *a* graden. Een nauwkeuriger bepaling verkrijgt men, door bij zichzelf de afstand latje - oog precies te meten.

e. Voor het meten van hoeken boven de gezichteinder is er een eenvoudig hulpmiddel dat een nauwkeurigheid van 0,4° geeft.[1] Neem een rechthoekig stuk karton, prik daarin een gaatje C, en laat daardoor een draad CM hangen, op een of andere wijze bezwaard en als schietlood dienend (fig. 94). De waarnemer richt de zijde AB nauwkeurig naar de boomtop waarvan de hoogte gemeten wordt, zwenkt het karton even, zodat de draad eerst vrij hangt en dan zacht tegen het karton aandrukt. Op het karton zijn de lijnen CD ⊥ AB en DF ∥ AB getrokken, de eerste liefst 10 cm lang. De hoek DCM is nu gelijk aan de hoek van AB met het horizontale vlak, hij is te meten met een gradenboog, of te berekenen uit zijn tangens TD/CD; voor kleine hoeken is

$$\frac{\mathrm{TD\ (in\ cm)}}{10}$$

gelijk aan de hoek in radialen.

1) Science, **66**, 507, 1927. De Harvard-sterrewacht heeft zulk een toestelletje gestuurd aan haar vrijwillige meteoor-waarnemers.

Lijst van enkele afkortingen, gebruikt bij het aanhalen van tijdschriften.

Abh. = Abhandlungen.
Ann. soc. mét. France = Annuaire de la Société météorologique de France.
Ann. = Annalen, Annales.
Arch. = Archiv, Archives.
A.N. = Astronomische Nachrichten.
Beitr. = Beiträge.
Ber. = Berichte.
C.R. = Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris.
Geogr. = Geographical.
Geoph. = Geophysical, geophysikalisches.
Hydr. = Hydrographie.
J.R.A.S. Can. = Journal of the Royal Astronomical Society of Canada.
Journ. = Journal.
Met. = Meteorological, Meteorologische, Meteorologie.
Mag. = Magazine.
Mitt. Ver. Fr. d. Astron. = Mitteilungen des Vereins der Freunde der Astronomie enz.
M.W.R. = Monthly Weather Review.
Nat. = Nature.
Naturwiss. = die Naturwissenschaften, naturwissenschaftlich.
Onweders, enz. = Onweders en Optische Verschijnselen in Nederland.
Peterm. Mitt. = Petermann's geographische Mitteilungen.
Phil. Mag. = Philosophical Magazine.
Philos. = Philosophical, Philosophie.
Phys. = Physikalische, Physik, Physical.
Pogg. Ann. = Annalen der Physik, Poggendorff'sche Reihe.
Proc. R. Soc. = Proceedings of the Royal Society of London.
Q.J. = Quarterly Journal of Theoretical and Applied Meteorology.
Rep. Brit. Ass. = Report of the British Association.
Rev. = Review, Revue.
Schr. naturf. Ges. = Schriften der naturforschenden Gesellschaft.
Sc. = Science, scientific.
Trans. = Transactions.
Verh. = Verhandelingen, Verhandlungen.
Vid. Selsk. Forh. = Videnskabs Selskabets Forhandlinger.
Zs. = Zeitschrift.

Woordenlijst+

+ Bij verwijzingen naar het laatste hoofdstuk zijn de aangegeven nummers der bladzijden met één eenheid te vermeerderen (230-270 wordt 231-272).